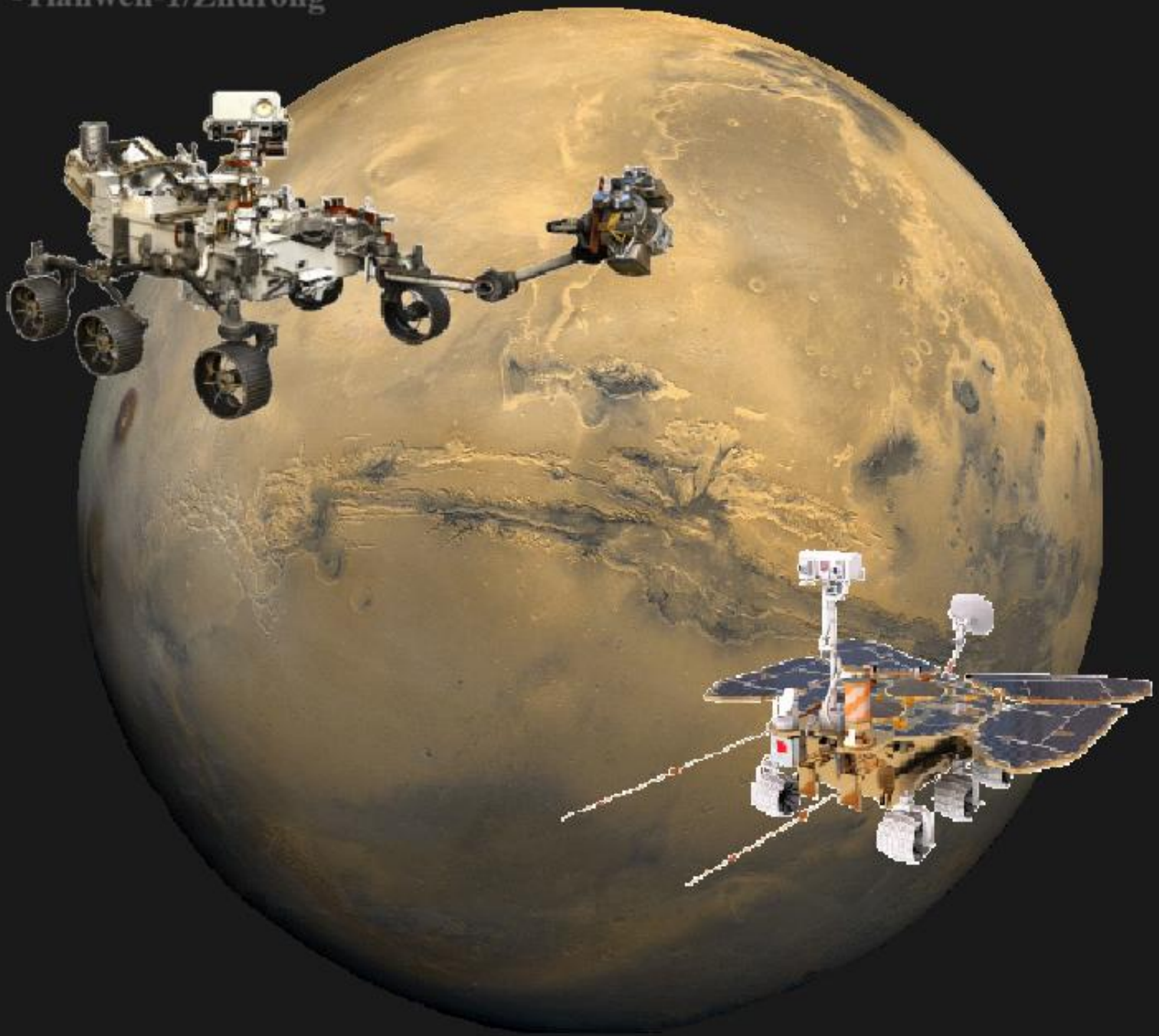
Les Panoramiques Martiens

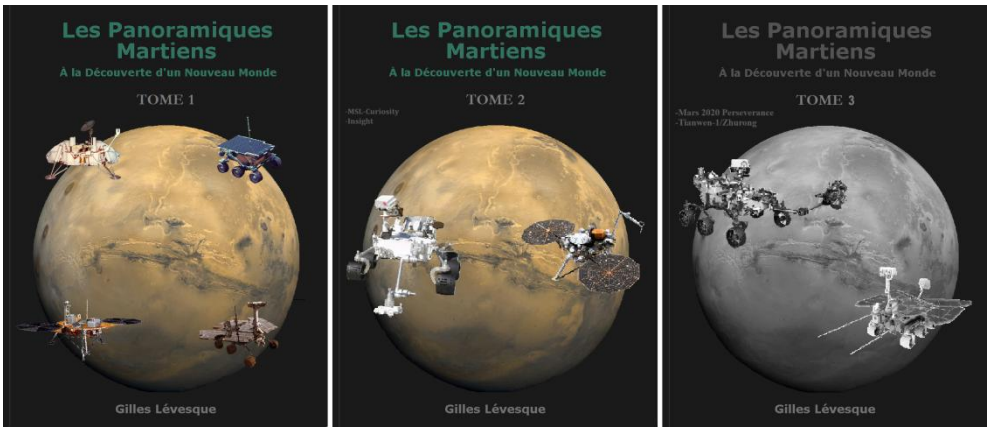
À la Découverte d'un Nouveau Monde

TOME 3

-Mars 2020 Perseverance
-Tianwen-1/Zhurong



Gilles Lévesque



Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International

Les Panoramiques Martiens

À la découverte d'un nouveau monde

TOME 3

Gilles Lévesque
gilleslevesque98@gmail.com

Illustration de couverture :
Photo d'arrière plan : NASA/Viking 1 Orbiteur : 22-02-1980
Montage graphique de l'auteur

ISBN

© 2024-2035, ÉDITEUR

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayant cause, est illicite et constitue une contrefaçon, aux termes des articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Un merci tout spéciale aux magiciens de la retouche d'image de l'Ancien Forum UMFS (fermé et archivé sur Internet Archive en janvier 2025[1]) et autres :

Jim Bell et Jonathan Joseph
Damia Bouic
Steve Albers
Franz Tauber
Paul Hammond
Doug Ellison
Simeon Schmauß
James Sorenson
Thomas Appéré
Neville Thompson (NeV-T)
Kevin M. Gill
Olivier de Goursac
Elisabetta Bonora & Marco Faccin
Andreas Plesch

[1] https://umsfarchive.com/index.php/index.php

SOMMAIRE

Introduction 1
Les Panoramiques de Tianwen-1 Zhùróng 11
L'équipement Scientifique du Rover 11
Le Transite vers Mars 15
Durée nominale de la mission (Sols 1 à 90) 21
Cause des changements climatiques 23
Mission Étendue (Sols 91 à 325) 39
Les Panoramiques de Mars 2020 Perseverance 55
L'équipement du Rover Perseverance 55
Décollage, Transite et Atterrissage 67
Perseverance et Ingenuity (Sols 1 à 90) 71
Campagne Sud Artuby Ridge (Sols 91 à 379) 87
En Route vers le Delta (Sols 380 à 409) 113
La Campagne du Front du Delta (Sols 410 à 707) 119
Campagne du Sommet du Delta (Sols 708 à 913) 145
Campagne Margin Unit et Neretva Vallis (Sols 914 à 1234) 161
Campagne de la Crête Ouest du Cratère (Sols 1244 à 1703) 181
Campagne Nili Fossae (Sols 1704 à xxxx) 211
Annexe 229
Général 231
Tianwen-1 Zhùróng 235
Mars 2020 Perseverance 243
Références Web 263

INTRODUCTION

Nous poursuivons l'aventure de l'exploration spatiale de la surface de la planète Mars, avec les deux missions martiennes qui ont suivit les huit premières traitées dans le premier et le deuxième tome. Il s'agit de la mission d'exploration spatiale américaine Mars 2020 Perseverance lancée le 30 juillet 2020, et de la toute première mission d'exploration interplanétaire chinoise dirigée vers la planète Mars dénommée Tianwen-1/Zhurong lancée une semaine plus tôt le 23 juillet 2020. Dans un premier temps, il est bon de rappeler que la sonde soviétique Mars 2 a été le premier engin spatial fabriqué par l'homme à toucher la surface de la planète rouge lors de son atterrissage catastrophique survenue le 27 novembre 1971. L'étage de descente aurait mal fonctionné après l'entrée dans l'atmosphère sous un angle trop prononcé, la séquence de descente s'est mal enclenchée et le parachute ne s'est pas déployé avant que le module de descente s'écrase sur Mars. Toutes les tentatives pour contacter l'atterrisseur après l'accident ont toutes échoué. La sonde soviétique Mars 6 a été la troisième sonde spatiale à s'écraser sur la planète Mars le 12 mars 1974. Lors de la descente atmosphérique contrôlée par un altimètre radar, le module d'atterrissage à bien fonctionné, le parachute a bien été déployé pour ralentir la descente de la sonde. Mais pour une raison qui reste encore inconnue, au moment où les rétrofusées devaient être allumées au cours des dernières secondes en vue de l'atterrissage, tout contact avec Mars 6 a soudain été perdu. D'autres échecs viendront pourtant obscurcir ce tableau de chasse des sondes perdues à la surface martienne, mais plus de la moitié (60%) d'entre elles seront de très grande réussite tant sur le plan technologique que scientifique. Une grande partie du texte qui suit est extrait de l'excellente synthèse de Phillipe Labrot[2] sur l'histoire de l'exploration martienne, sur ses réussites et ses échecs (les images ont été ajoutées par l'auteur) :

« Le 20 juillet 1976, l'atterrisseur Viking 1 de la NASA se posait sans encombre sur les plaines de Chryse, devenant le premier engin de l'histoire de l'humanité à rejoindre sain et sauf la surface poussiéreuse et rouillée de la planète rouge. Avant cette date jalon, l'Union soviétique avait tenté à plusieurs reprises de ravir ce trophée aux américains, sans succès. Plus proche de nous, de rares et timorées tentatives européennes échoueront également de manière assez brutale. Jusqu'à présent, la surface martienne restait donc la chasse bien gardée de la NASA. Avec Tianwen-1, qui comporte un orbiteur, un atterrisseur et un rover, et dès sa première tentative, la Chine vient de mettre fin à cette domination sans partage, et l'événement est aussi symbolique que prophétique pour l'avenir de l'exploration martienne.

Parmi tous les corps du système solaire, Mars pose aux ingénieurs qui souhaitent rejoindre sa surface de redoutables problèmes. Le principal responsable n'est autre que l'atmosphère martienne, qui bien que présente est également très ténue. Mieux aurait fallu que la planète rouge ait laissé fuir tout son air dans l'espace, pour devenir un astre sans enveloppe gazeuse, comme c'est le cas pour la Lune. Ou bien qu'au contraire, qu'elle ait pu conserver une atmosphère très

[2] Nirgal : La Chine se pose sur Mars, de Philippe Labrot

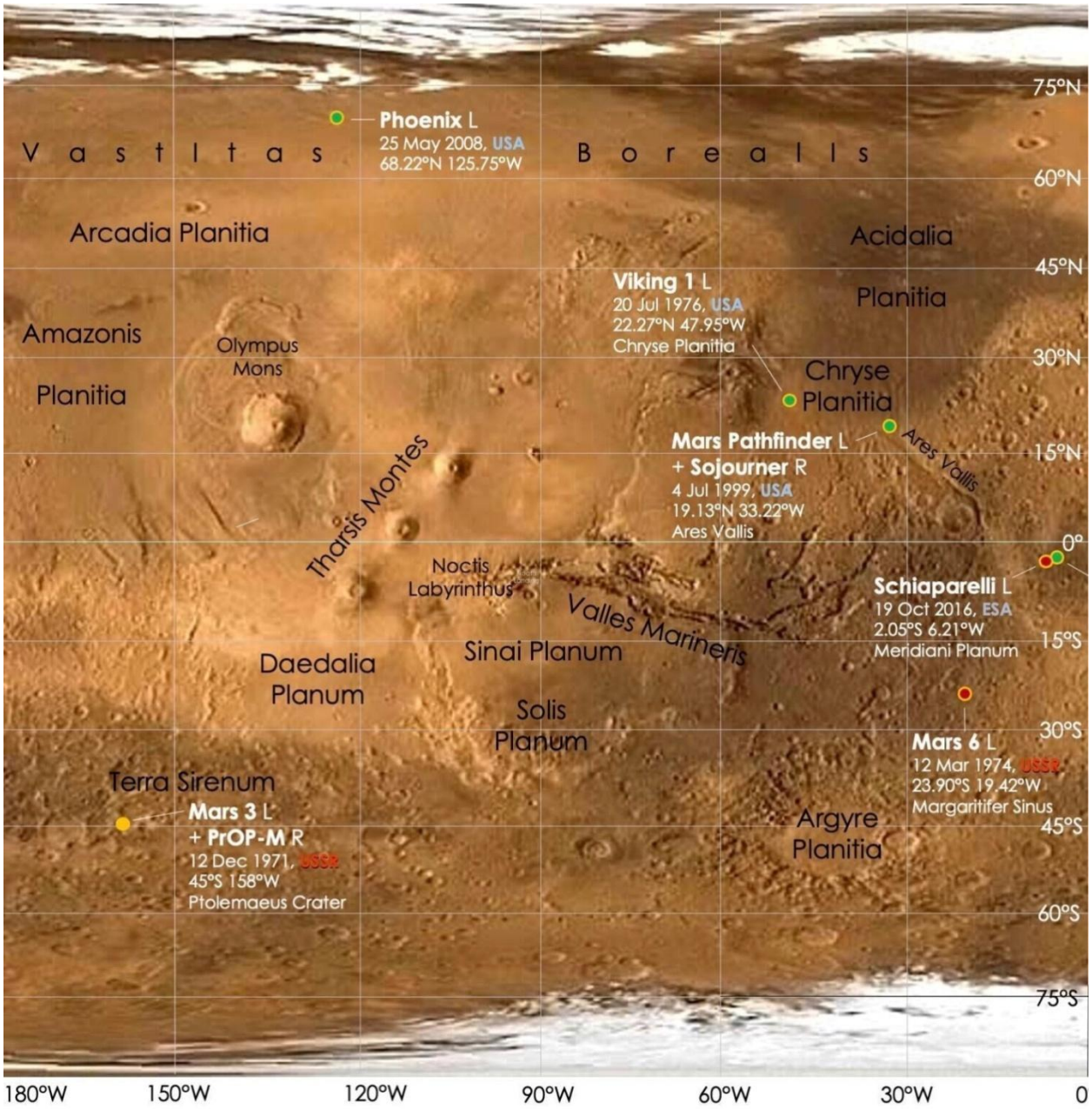
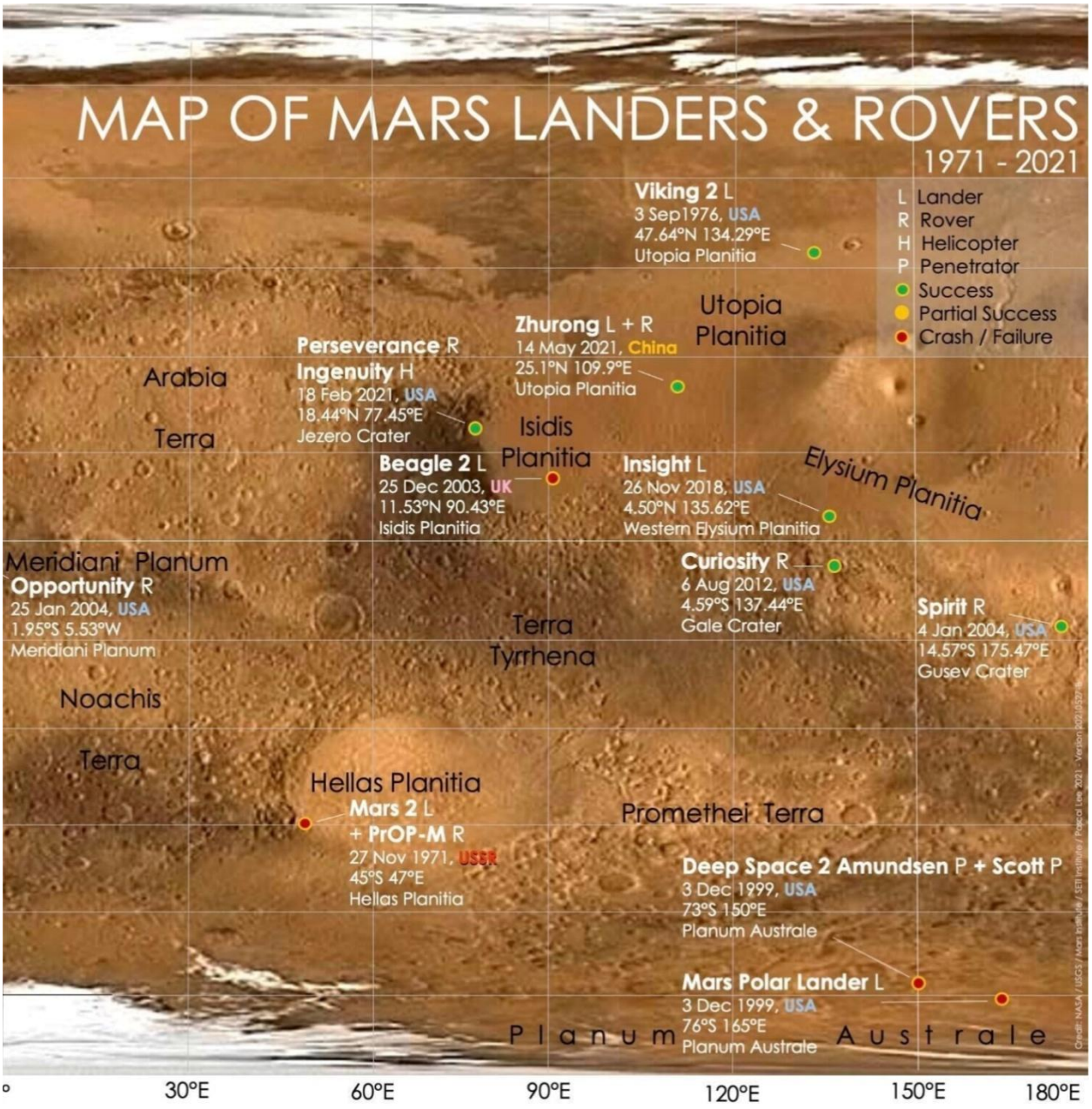


Figure 1 : Liste des sites d'atterrissages sur la planète Mars (Crédit : Pascal Lee)

épaisse autour d'elle, à l'image de celle de la Terre, du satellite Titan de Saturne, ou mieux encore, de la planète Vénus. Mais si ces deux cas extrêmes - absence d'atmosphère ou atmosphère très épaisse - étaient devenus réalité, Mars n'aurait sans doute pas été Mars.

La présence d'une atmosphère aussi fine que dynamique et instable autour de la planète rouge oblige les ingénieurs à encapsuler leurs sondes derrière un lourd et imposant bouclier thermique. Quand ces dernières sont lancées directement depuis la Terre, elles arrivent en effet à destination avec une vitesse folle, de l'ordre de 20 000 km/s. Sans bouclier thermique, elles finiraient alors en boule de feu dès qu'elles frôleraient la couche atmosphérique pourtant très fine qui débute à environ 120 km d'altitude. Et si elles sont larguées depuis l'orbite martienne, comme



ce fut le cas pour Viking et Tianwen-1, là aussi le bouclier thermique demeure indispensable.

Grâce au freinage fourni par la friction du bouclier thermique avec l'atmosphère, les atterrisseurs parviennent à perdre 90 % de leur vitesse, tout en allant encore bien trop vite pour avoir une chance de rejoindre le sol en un seul morceau. La suite des opérations consiste alors à déployer immanquablement un ou plusieurs parachutes, pour ralentir le plus possible dans l'air très ténu de Mars. Cependant, même si l'efficacité du freinage parvient à être maximale – ce qui est rarement le cas, car malgré les modélisations et calculs savants que les ingénieurs peuvent réaliser, l'atmosphère martienne est, à cause de sa finesse, aussi changeante que capricieuse – ce n'est pas encore suffisant. Un troisième niveau de freinage doit avoir lieu durant la phase terminale de la descente pour adoucir au maximum le contact avec le sol, par l'intermédiaire soit

de rétrofusées, ou d'airbags gonflés au dernier moment.

Depuis les débuts de la conquête spatiale dans les années 1960, la situation que nous venons de décrire n'a pas changé d'un iota. Malgré un nombre d'études incalculables ou d'idées plus ou moins lumineuses, aucune astuce miraculeuse n'a jamais été trouvée pour simplifier ou sécuriser les atterrissages sur Mars. Hormis, peut-être, la mise en œuvre d'un niveau vertigineux de maîtrise technologique (avec les budgets qui vont avec), dont la NASA était à présent seul détentrice. Dans l'exploration martienne, l'expérience est effectivement un trésor de guerre.

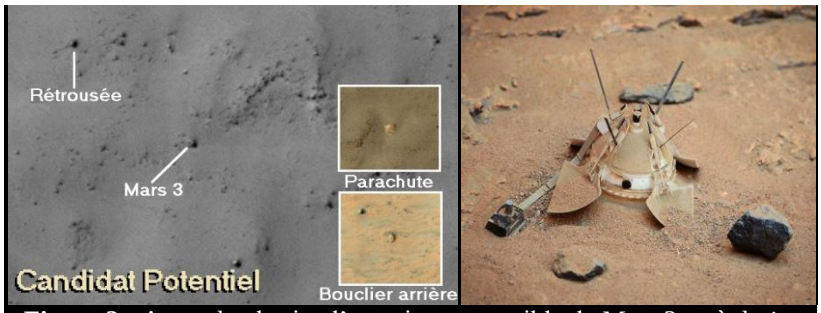


Figure 2 : A gauche, le site d'atterrissage possible de Mars 3, et à droite vue d'artiste du module d'atterrissage à la surface de Mars. (Crédit : NASA/JPL/MSSS & JPL-Caltech/Univ. Of Arizona)

Au cours de l'histoire de la conquête spatiale, l'Union soviétique a été la première à tenter de mettre le pied sur Mars, et elle à bien failli coiffer tout le monde au poteau avec le module d'atterrissage de la sonde Mars 3[3] (Figure 2) en décembre 1971. Hélas, Mars 3 avait été conçu pour être largué de manière entièrement automatique : le moment de son éjection était effectivement programmé dans ses mémoires bien avant son départ, sans que les ingénieurs aient ensuite la possibilité de l'annuler ou de le différer. Une fois parvenu sur place, et par une malchance impossible à prévoir, le module fut aveuglément propulsé vers le secteur de Terra Sirenum ... au beau milieu d'une gigantesque tempête de poussière. Ballotté dans tous les sens comme un fétu de paille, l'infortuné engin parvient miraculeusement à atteindre la surface, avant que les communications ne soient brutalement et définitivement coupées 20 secondes plus tard. Mars 3 aura juste le temps de transmettre à la terre la première partie d'une image terriblement sombre et qui, même avec les techniques de traitement d'images actuelles, reste encore aujourd'hui globalement incompréhensible. Sur le fragment d'image transmis à la Terre, on ne sait effectivement pas où est le sol et où est le ciel. Il est de plus possible que suite à l'impact avec la surface, la sonde se soit retournée, et ait pris son unique cliché à l'envers. L'image ne montre peut-être même rien de martien : ce qui a été imagé par l'objectif de la caméra pourrait n'être que la toile du parachute, qui aurait pu retomber sur la sonde en la recouvrant presque complètement. Suite à Mars 3, aucune autre tentative, soviétique ou russe, de rejoindre la surface martienne n'aboutira.

Après le triomphe des sondes Viking en 1976, la NASA retournera sur Mars vingt années plus tard, en parvenant à déployer en 1997 sur la plaine fluviale d'Ares Vallis le premier rover de toute l'histoire de l'exploration martienne, Sojourner. Son véhicule porteur, Pathfinder, mettra pour la première fois en œuvre un système d'airbags pour la phase finale de la descente, celle au cours de laquelle a lieu le contact tant rêvé avec le sol. L'arrivée de la sonde avait été programmée pour coïncider avec le jour de l'Indépendance américaine, qui est fêté chaque année au 4 juillet (l'idée avait déjà été étudiée pour les Viking, pour être ensuite abandonnée lorsque la nature très accidentée du site d'atterrissage initialement retenu devint une évidence). Depuis les premiers tours de roues et galipettes de Sojourner dans la poussière martienne, la NASA est

[3] Comment nous avons recherché Mars-3, Vitaliy Egorov, 12 avril 2013

parvenue à poser des machines roulantes d'une taille toujours plus imposante et d'une complexité toujours plus grande : Spirit et Opportunity en 2003, Curiosity en 2012 et Perseverance en 2021 (ce dernier embarquant également un hélicoptère qui a permis, pour la première fois, de quitter le sol). Des engins fixes seront également posés au sol, Phoenix dans les régions arctiques en 2008 et la station géophysique InSight en 2018 sur la plaine équatoriale d'Elysium. Si elle n'avait pas perdue sa sonde low-cost Mars Polar Lander (Figure 3) au-dessus du pôle sud en décembre 1999, la NASA aurait connu un sans-faute.

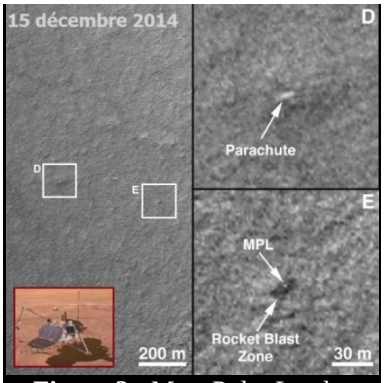


Figure 3 : Mars Polar Lander
(Crédit : NASA/JPL/MSSS)

Les russes continuant à jouer de malchance même avec les satellites destinés à se placer en orbite martienne (comme l'illustrent les pertes dramatiques des sondes Mars 96 en 1996 et Phobos-Grunt en 2011, incapables de quitter la banlieue terrestre), l'Europe fut le seul acteur à oser tenter de rivaliser avec les américains, en vain. La première tentative, réalisée avec le petit module britannique Beagle 2 (Figure 4), ne fut pourtant rien moins qu'héroïque. Financée en bonne partie sur fonds privées par son responsable, le charismatique Colin Pillinger, Beagle 2 fut adossée plutôt de force que de gré à la mission Mars Express de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). La collaboration entre les britanniques et l'ESA fut particulièrement houleuse, et cette situation déplorable, douloureusement décrite par Colin Pillinger dans son livre autobiographique « My Life on Mars », un ouvrage aussi dense que sidérant, condamna sans doute le petit atterrisseur bien avant son lancement.

Figure 4 : Beagle
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/UArizona)

Beagle 2 disparut corps et âme le 25 décembre 2003 lors de sa descente vers la plaine d'Isidis. Malgré de nombreuses tentatives pour rétablir les communications, les immenses paraboles des radiotélescopes terrestres recrutés dans l'urgence pour le sauvetage restèrent silencieuses. Onze années plus tard, l'épave fut localisée grâce à la caméra à très haute résolution d'un satellite américain (Mars Reconnaissance Orbiter), et les ingénieurs découvrirent stupéfaits que la petite sonde avait contre toute attente réussi à parvenir au sol saine et sauve, après la traversée de l'atmosphère sous bouclier thermique, la descente sous parachute et le déploiement d'airbags. C'est en refusant de s'ouvrir que l'un des panneaux solaires, en bouchant le champ de vision de l'unique antenne de communication, mettra du même coup fin de façon irrévocable et cruelle à la mission.

L'agence spatiale européenne tentera de retourner sur Mars en 2016, avec le module Schiaparelli (Figure 5) de la mission ExoMars. Contrairement à Beagle 2, son sort fut très rapidement connu, épargnant à ses concepteurs les angoisses de l'attente et de l'incertitude. Le 19 octobre 2016, durant la descente, peu après avoir déployé son parachute, les communications furent brutalement coupées, ce qui sur Mars n'est jamais de bonne augure. Le lendemain, en survolant le site d'atterrissage, le satellite Mars Reconnaissance Orbiter découvrit la présence d'une nouvelle tâche sombre à la surface martienne, et des prises de vues ultérieures en expliquèrent la raison : la cicatrice hideuse d'un cratère d'impact de 2,5 mètres de diamètre,

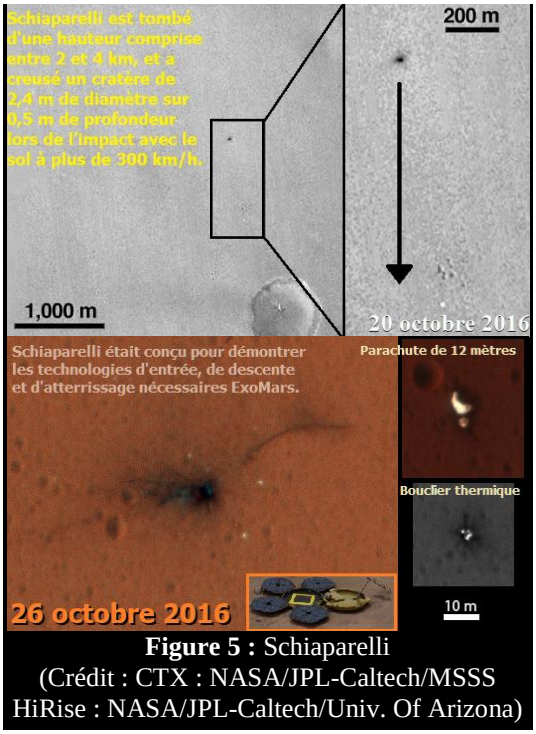


Figure 5 : Schiaparelli
(Crédit : CTX : NASA/JPL-Caltech/MSSS
HiRise : NASA/JPL-Caltech/Univ. Of Arizona)

entourés de débris métalliques tordus et calcinés.

La cause de l'échec du module Schiaparelli fut rapidement identifiée : juste après l'ouverture de son parachute, l'engin se mit à osciller, en troublant pendant un instant sa station de navigation inertielle, dispositif dont la sonde dépend pour connaître son orientation dans l'espace. La période, pourtant très courte, de désorientation, signa la fin de la capsule, qui devint comme folle. Mis face à une avalanche de données incohérentes, l'ordinateur de bord décida de manière erronée que le contact avec la surface martienne avait été soudainement atteint (et plus qu'atteint : le calculateur détermina que son altitude était passé presque instantanément de quelques kilomètres à -18 km sous la surface !), et ce alors que la sonde était encore en réalité en plein vol. Toujours d'après les données de la centrale de navigation inertielle, l'orientation supposée de Schiaparelli dans l'espace était devenue on ne peut plus improbable : pour l'ordinateur de bord, la sonde avait apparemment la tête en bas, après une culbute à 180° : une situation impossible, étant donné que le radar, dont les antennes sont par nature dirigées vers le bas, était toujours verrouillé sur le sol, et non en train de fouiller désespérément le ciel. Face à ce chaos d'informations, Schiaparelli largua son bouclier arrière (sur lequel était attaché le parachute), alluma ses rétrofusées pendant 3 secondes avant de les couper tout aussi capricieusement, et termina son périple par une chute libre de presque 4 kilomètres, en frappant la surface à une vitesse d'environ 300 km/h. Comble de l'ironie, incapable de déterminer qu'il tombait comme une pierre (une information pourtant fournie par le moindre accéléromètre à bord), il commença à activer ses instruments, pensant être arrivé à bon port, immobile et en sécurité à la surface de Mars.

L'échec dramatique et peu flatteur de Schiaparelli, les nombreux reports du programme ExoMars auquel il appartient, et l'annulation du lancement du rover Rosalind Franklin en 2020 à cause d'une série d'anomalies techniques critiques touchant les deux parachutes principaux, illustrent bien à quel point l'atterrissage sur Mars reste un exercice de haute voltige, et permet de comprendre toute la portée de l'exploit réalisé par la Chine avec Tianwen-1. » [Fin de citation].

Qui l'aurait crue, un petit robot se promenant sur Mars durant quatorze ans et demi, résistant à des variations de température quotidienne frôlant les 90 °C en saison hivernale, et ayant survécu à plusieurs tempêtes de poussière pouvant recouvrir la planète tout entière en cachant la lumière solaire. Danger mortel pour les atterrisseurs et les rovers MER, ayant même mis fin à la mission de Phoenix en septembre 2008 et de Spirit en mars 2010. L'astromobile Opportunity à peine sortie de l'enfance a survécu jusqu'à l'arrivée de son grand frère Curiosity en août 2012, et la accompagnée jusqu'à l'adolescence pour se terminer en juin 2018 quelque mois avant l'arrivé de l'atterrisseur InSight en novembre, succombant à l'arrivé d'une tempête de poussières globale qui s'était levée une semaine après l'arrivé de l'équinoxe du printemps.

Curiosity a pris la relève jusqu'en février 2021 à l'arrivée de Perseverance et de leur petite sœur éloignée Zhurong en mai 2021. Toute cette histoire rencontre un exploit et une réussite extraordinaire entreprit par toute la communauté humaine. Poussée par une quête de connaissance, elle nous a poussées à nous surpasser en recherche technologique et en science. Le but de cette série de livre sur Mars est de montrer la pertinence de l'exploration spatiale et des découvertes qu'elles apportent sur une meilleure compréhension de l'évolution planétaire, mais surtout sur la beauté des paysages visités. Cette histoire de l'exploration martienne a fait coopérer et travailler ensemble la communauté scientifique et technique de par le monde entier, c'est notre exploit à tous, ne l'oublions pas !

Après avoir suivit la piste de l'eau (MER et Phoenix) et de l'habitabilité (Curiosity et Phoenix), il était maintenant venue le temps d'entamer une quête plus poussée sur la recherche de trace de molécules organiques avec l'astromobile Mars 2020 Perseverance (qui constitue la première étape du projet de retour d'échantillons martiens). La recherche sur des traces de vie ayant pu exister par le passé, se situant tout juste après la formation de la planète, devient ainsi la suite logique de l'exploration martienne. Les découvertes effectuées par Curiosity dans le cratère « Gale » et par le rover Perseverance explorant le cratère « Jezero » sur les argiles, la silice et le passé aquatique sur Mars, ainsi que la découverte du quartz et de longue chaîne de composées organique. Orientes dès à présent les objectifs prioritaires pour les futures missions martiennes, concernant la recherche exobiologique d'une ancienne trace de vie ayant pu exister et se développer à proximité de zones d'activité hydrothermale à la surface de la planète. Dans ce but, le rover Perseverance à collecter un ensemble d'échantillons hermétiquement scellés dans des tubes, que le robot a déposés à différents endroits sur le sol martien. Les échantillons devront être ramenés sur Terre lors d'une mission ultérieure dans le cadre d'un programme de retour d'échantillons de Mars, où ils seront scrutés en laboratoire pour identifier d'éventuelles traces organiques de vie ancienne. Sur Terre, certains des plus anciens microfossiles organiques ont été trouvés dans des cherts, une roche sédimentaire riche en silice. Une explication réside dans le rôle protecteur que joue les matrices argileuses de silice hydratée qui minimise la dégradation moléculaire des micro-organismes.

Figure 6 : Mars Sample Return (Crédit : NASA)

L'astrobiologie est l'étude de l'origine, de l'évolution et de la répartition de la vie dans l'Univers, et la recherche de la vie sur Mars est l'un des objectifs majeurs. Alors que les humains se demandent depuis longtemps s'il existe d'autres formes de vies au-delà de la Terre. La découverte de la vie extraterrestre est un aspect central de l'astrobiologie, et la recherche de vie sur une planète rocheuse autrefois habitable comme Mars, serait un atout important pour mieux comprendre notre propre origine et évolution sur Terre, en plus de fournir des informations permettant de retracer l'histoire de Mars. Il existe deux programmes de retour d'échantillons martiens, et l'un deux est mené conjointement par la NASA et l'ESA qui vise à ramener pour la première fois sur Terre des échantillons de Mars qui ont été soigneusement sélectionnés par l'astromobile Perseverance lors de la mission Mars 2020, dans le but de faire des analyses plus approfondies en laboratoire sur Terre. Ce projet ambitieux connu sous le nom de Mars Sample Return (MSR), qui a été interrompus en janvier 2026 par manque de budget, impliquait le lancement de trois sondes spatiales distinctes pour collecter (effectué par Mars 2020 Perseverance), stocker, et rapatrier les échantillons (prévue vers 2030-40). La mission principale

aurait été effectuée en plusieurs étapes et elle consiste à déposer un atterrisseur (SRL, Sample Retrieval Lander) équipé d'un bras articulé sous maîtrise d'œuvre de la NASA. L'atterrisseur sera munis d'une petite fusée (MAV, Mars Ascent Vehicle) à propergol solide comportant deux étages, qui doit ramener les échantillons en orbite dans un container pour faire la jonction avec un deuxième engin spatial placé en orbite basse autour de Mars (ERO, Earth Return Orbiter), sous maîtrise d'œuvre de l'Agence spatiale européenne, et qui assurera également le support des télécommunications pour les opérations au sol depuis l'orbite martienne. La mission sera également équipé d'un rover (SFR, Sample Fetch Rover, ou de la réutilisation de Perseverance si son état le permet) chargé d'aller rechercher les échantillons, et qui sera assisté dans sa tâche par deux petits hélicoptères (HRH, Sample Recovery Helicopter) dédiés à collecter les tubes scellés laissés au sol par l'astromobile Perseverance.

La Chine a décidé en 2021 de développer également une mission de retour d'échantillons martiens, connu sous le nom de Tianwen-3. Il s'agit d'un projet robotique très ambitieux de l'Administration spatiale nationale chinoise (CNSA) avec une coopération internationale, dont le lancement est prévu pour la fenêtre de décembre 2028 à janvier 2029, avec un retour des échantillons sur Terre prévu en 2031. Le vaisseau spatial Tianwen-3 comprend un atterrisseur, un véhicule d'ascension, un module de service, un orbiteur et un module de retour, et il est équipé de six charges utiles scientifiques. L'orbiteur évoluera sur une orbite martienne circulaire à une altitude d'environ 350 km, et sa durée de vie prévue est d'au moins cinq ans. Le scénario chinois repose sur le lancement de deux missions par des fusées lourdes Longue Marche 5 depuis la base de lancement de Wenchang sur l'île Hainan. La première serait chargée de se poser sur le sol martien, de prélever les échantillons de sol et de remonter en orbite, tandis que la deuxième mission serait chargée de récupérer le container d'échantillons en orbite martienne et de le ramener sur Terre. L'atterrisseur serait équipé d'un bras robotique et d'une foreuse capable d'atteindre 2 mètres de profondeur. Une fois récoltés les échantillons sont placés en orbite autour de Mars à l'aide d'un lanceur puis récupérés par un orbiteur au cours d'un rendez-vous spatial.

Entre temps, nous auront la mission européenne ExoMars avec le déploiement à la surface du rover Rosalind Franklin prévu vers 2028, dont la mission est de faire la recherche de traces de vie passées et présentes sous la surface de Mars dans la région de « Oxia Planum », situé à plus 3 200 km au sud-est du site d'atterrissage de Viking 1 et à environ 850 km au sud-est de la station commémorative Carl Sagan de Pathfinder. Le rover Rosalind Franklin est doté d'un ensemble d'instruments unique pour cette mission. Des caméras, des spectromètres, un radar à pénétration de sol et un laboratoire d'analyse pour étudier le contexte géologique du paysage et examineront des échantillons prélevés à l'aide d'une foreuse capable d'atteindre deux mètres sous la surface martienne. L'astromobile Rosalind Franklin sera équipé d'un radar (WISDOM) à pénétration de sol, d'un ensemble de caméras panoramiques PanCam, d'une caméra d'imagerie rapprochée CLUPI (Close-UP Imager) fixée sur le côté du boîtier de forage. La caméra CLUPI est conçue pour acquérir des images couleur haute résolution des affleurements, des roches et des sols. Les caméras PanCam et CLUPI aideront à identifier les sites de forage les plus prometteurs. Le rover sera le premier à atteindre une profondeur de deux mètres sous la surface, pour prélever des échantillons protégés des radiations de surface et des températures extrêmes. Rosalind Franklin creusera, collectera et analysera la composition chimique des matériaux prélevés par la foreuse grâce au module ALD (Analytical Laboratory Drawer), ou tiroir laboratoire analytique, conçu comme un véritable laboratoire miniature automatisé directement intégré à l'intérieur du châssis du rover. Le radar WISDOM aidera à déterminer les zones de forage optimales en identifiant les

cibles les plus prometteuses, afin d'éviter les dangers potentiels, comme la présence de roches enfouies susceptibles d'endommager la foreuse. Une fois la foreuse rétractée, l'échantillon se trouve dans une chambre spéciale située à l'extrémité de la foreuse, et sous l'effet de la gravité réduite de Mars (38 % de celle de la Terre), le matériau tombe sur un dispositif que le rover peut déployer vers l'avant pour récupérer les échantillons.

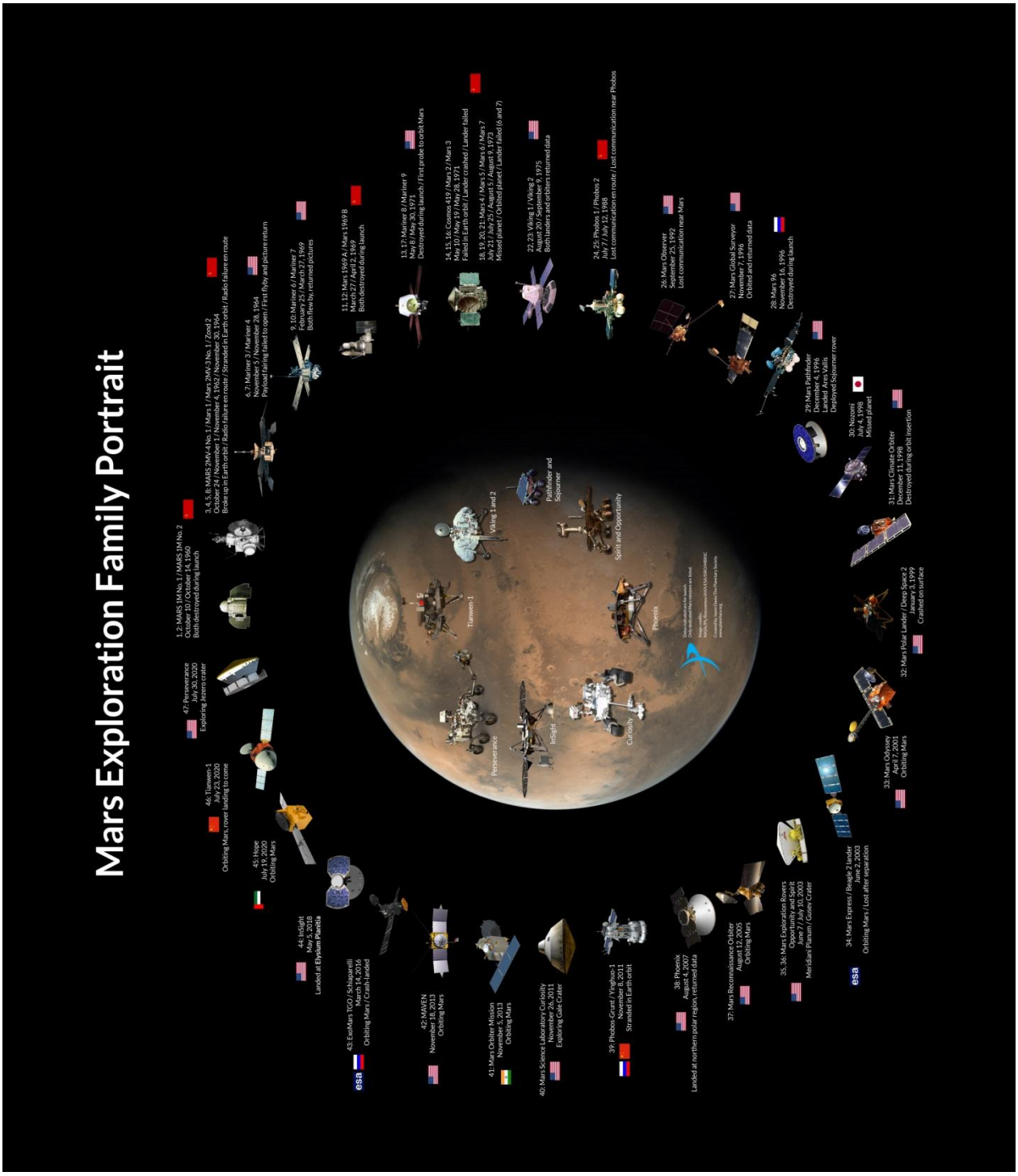


Figure 2 : Portrait de famille de l'exploration Martienne.
(Crédit : NASA/Roscosmos/JAXA/ESA/ISRO/Created by Jason Davis)

Vous pouvez retrouver les montages et les cartes de l'auteur sur le site flickr de partage de photos et de vidéos suivant :
https://www.flickr.com/photos/197507863@N02/

Les Panoramiques de Tianwen-1/Zhùróng

La sonde spatiale « Tianwen-1 » qui signifie en français « question au ciel », est la première sonde d'exploration interplanétaire de l'Administration spatiale nationale chinoise (CNSA). Le programme d'exploration martienne a été initié en 2016 et développée par la Société de sciences et technologies aérospatiales de Chine (CASC). La sonde spatiale d'une masse totale de près de cinq tonnes, comprend un orbiteur et un véhicule de descente atmosphérique (Figure 1). Le module de descente encapsule un bouclier arrière (Back Shell), qui contient le parachute supersonique de 15,96 mètres de diamètre, un atterrisseur chargé de la dernière phase de la descente équipé d'une seule rétrofusée centrale, un bouclier avant (Heat Shield) conçu pour résister à la forte chaleur, et un astromobile (rover) dénommé « Zhurong » (traduit par « dieu du feu » dans la mythologie chinoise) qui doit explorer la surface de la planète pour un minimum de 90 Sols (3 mois). Il s'agit d'une mission test servant à préparer la mission « Tianwen 3 », une mission beaucoup plus complexe de retour d'échantillons sur Mars qui devrait être lancée vers 2028. Les différents objectifs scientifiques de la mission portent sur la géologie et la structure interne de la planète, ainsi que l'identification des minéraux et des roches à la surface pour y détecter la présence historique de la circulation de l'eau, tout en faisant la caractérisation de l'environnement et de l'atmosphère de la planète. L'orbiteur est chargé des télécommunications et des manœuvres orbitales durant le trajet vers Mars, et pour ce faire il est équipé de 20 petits propulseurs pour effectuer des contrôles d'attitude et de petites corrections de trajectoire.

L'équipement Scientifique du Rover :

L'orbiteur embarque à son bord plus de la moitié des instruments scientifiques, soit un totale de sept instruments sur les treize que contient l'ensemble des différents modules de la mission (Orbiteur et rover). L'orbiteur remplit également la fonction de relais des télécommunications entre la terre et le rover à la surface, pour se faire il utilise 3 types d'antennes avec un débit compris entre 16 kbit/s et 4,096 Mbit/s. Il s'agit d'une grande antenne parabolique orientable à gain élevé de 2,5 mètres de diamètre et d'une antenne émettrice orientable à gain moyen, ainsi que plusieurs antennes omnidirectionnelles de faible gain ayant un débit plus faible. L'orbiteur est également équipé de deux caméras et de cinq instruments scientifiques (Figure 2). Il s'agit d'une caméra de moyenne

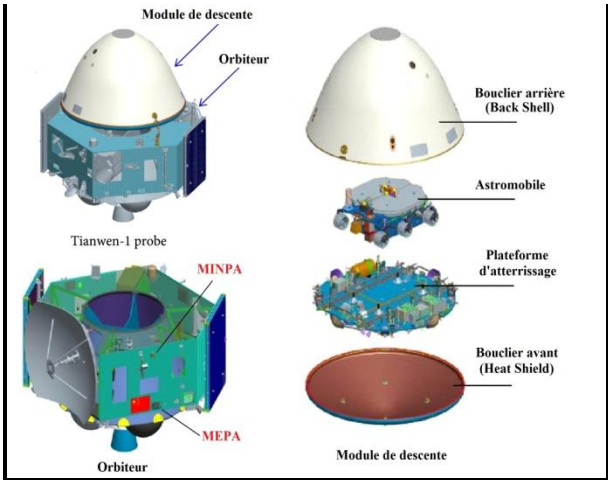


Figure 1 : Composants de l'orbiteur Tianwen-1 et du module de descente (Crédit : CNSA)

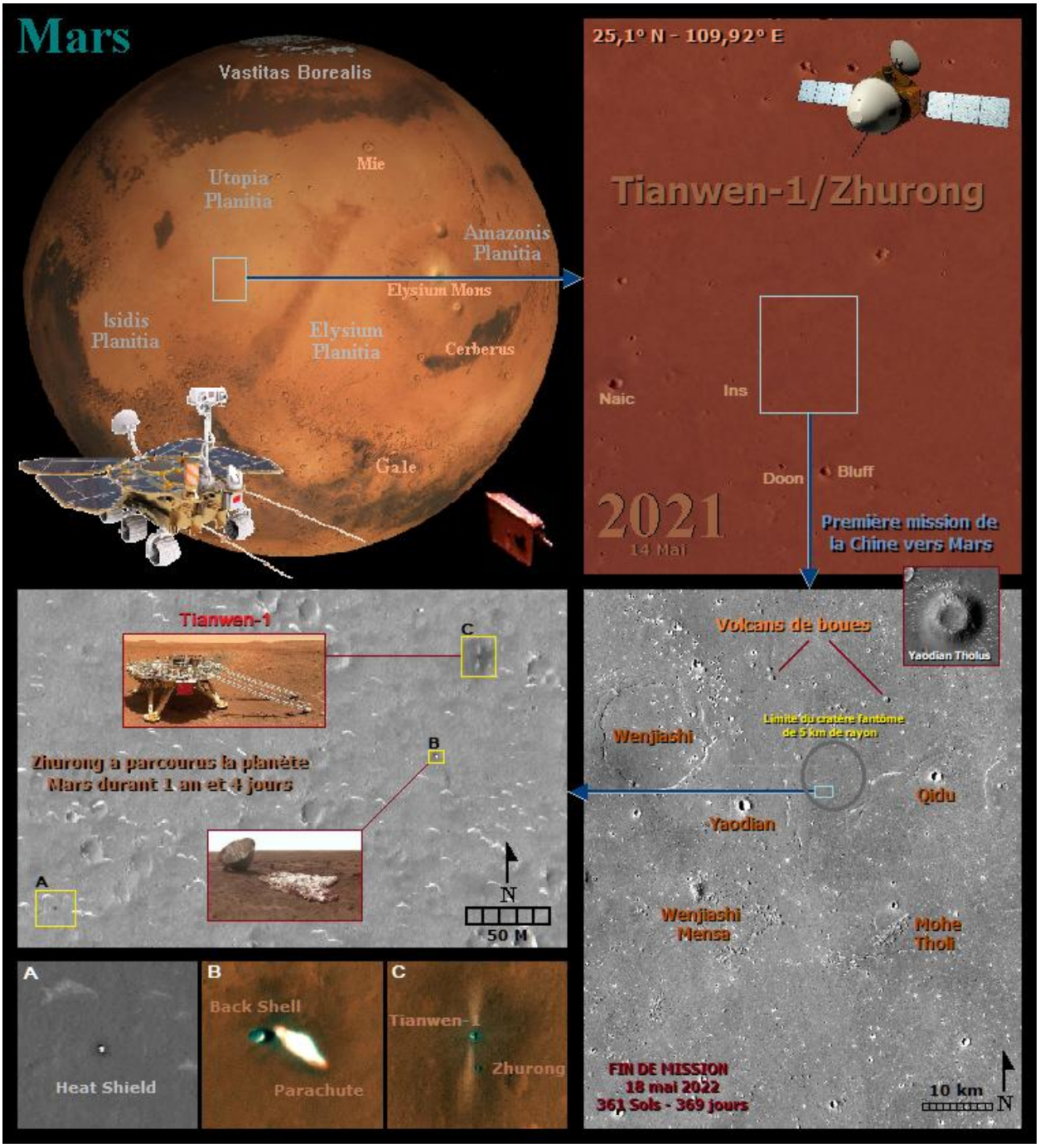


Planche 1 : Le site d'atterrissage de Tianwen-1 Zhùróng obtenu grâce aux données fournies par la caméra MOC de Mars Global Surveyor (MGS) le 1er avril 2022 (photo en bas à droite). La photo au centre et les trois photos en bas à gauche sont de la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) prise le 6 juin 2021. Les 2 photos du haut ayant participées au montage de cette maquette sont des orbiteurs Vikings.

résolution MoRIC (Moderate Resolution Imaging Camera) et d'une caméra à haute résolution HiRIC (High Resolution Imaging Camera), d'un radar à pénétration de sol MOSIR (Mars Orbiter Scientific Investigation Radar), d'un spectromètre infrarouge MMS (Mars Mineralogical Spectrometer) servant a analyser la composition chimique, d'un magnétomètre MOMAG (Mars Orbiter Magnetometer) pour mesurer les interactions entre l'ionosphère martienne et le vent

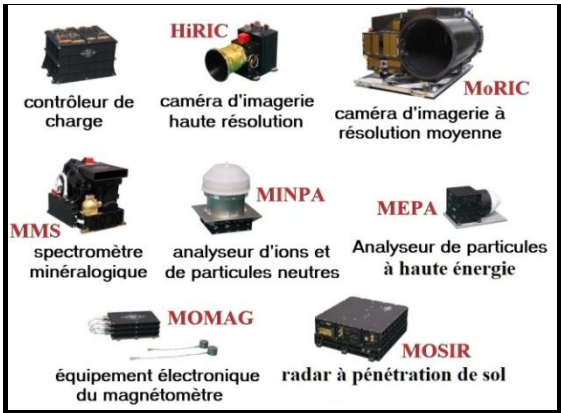


Figure 2 : Charge scientifique de l'orbiteur (Crédit : China National Space Administration)

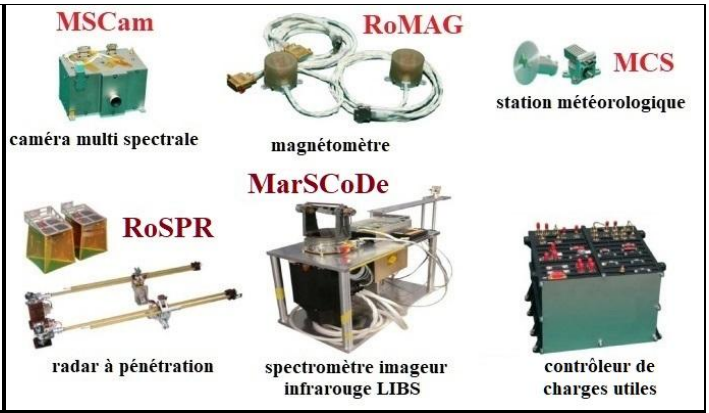


Figure 3 : Charge scientifique du rover (Crédit : China National Space Administration)

solaire, et de deux détecteurs de particules. Le spectromètre MINPA (Mars Ion and Neutral Particle Analyzer) qui mesure les particules neutres et les ions, et le spectromètre MEPA (Mars Energetic Particles Analyzer) pour les particules à plus haute énergie. L'astromobile d'une masse de 240 kg possède 4 panneaux solaires et six roues motrices de 30 cm avec moteur individuel, qui reprend l'architecture des rovers lunaires chinois Yutu et Yutu 2 (mission Chang'E-3 décembre 2013 et Chang'E-4 janvier 2019). Chaque roue est équipée d'un moteur supplémentaire agissant sur la direction pour donner au robot la capacité de tourner sur lui-même et de se déplacer latéralement. Zhurong peut également communiquer directement avec la Terre en bande UHF (Ultra haute fréquence, 300 MHz à 3 000 MHz) grâce à une antenne parabolique orientable à gain élevé de 36 cm de diamètre (débit de 16 bit/sec), avec possibilité de transmettre en bande X (8,0 GHz à 12 GHz) situé dans la plage de fréquence SHF (Supra-haute fréquence, 3 GHz à 30 GHz), mais l'essentiel des télécommunications sont effectuées avec l'orbiteur qui sert alors de relai. En raison du délai de télécommunications avec la Terre (environ 22 minutes), l'astromobile utilise un système de navigation autonome avec mémoire programmable, dont l'intelligence artificiel (ensemble de programme et de procédure d'analyse des données sophistiqué) permet de planifier de cours déplacement à la surface, de franchir de manière autonome des obstacles de 30 cm de haut et de gravir des pentes de 30° d'inclinaison. Le rover possède une vitesse de navigation d'environ 40 m/h, mais il peut aussi atteindre des pointes de vitesse maximale de 200 mètres/heure selon le niveau d'énergie emmagasiné dans ses batteries.

En plus des quatre caméras noir et blanc d'évitement des dangers (HazCam), fixé sous le capot par groupe de deux en avant et à l'arrière du rover. Le robot embarque à son bord comme charge utile six instruments scientifiques (Figure 3 et 4). Soit deux caméras de navigation et de terrain NaTeCam (Navigation and Terrain Camera) montée au sommet d'un mat, pouvant fournir des images stéréoscopiques couleur avec une résolution de 2 048 pixels. Toujours

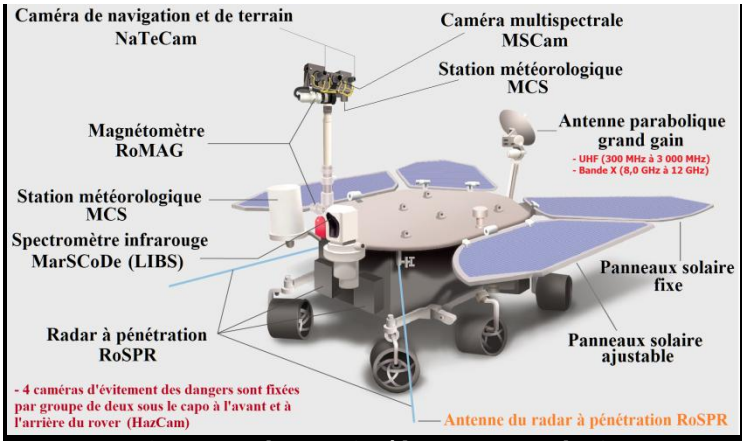


Figure 4 : Zhurong (Crédit : CNSA/Xinhua)

fixé au sommet du mat entre les caméras NaTeCam se trouve la caméra multispectrale MSCam (Multispectral Camera) pour étudier la composition des roches martienne, et le magnétomètre RoMAG (Mars Rover Magnetometer) composé de deux magnétomètre, un monté sur le mât et l'autre fixé à la base du mât à l'intersection du pont du rover et servant à étudier l'environnement magnétique. Le dernier instrument dont une partie est fixé au mât est la station météorologique MCS (Mars Climate Station) comprenant plusieurs capteurs. Dont un thermomètre capable de mesurer des intervalles de températures comprises entre −120 °C et +50 °C, d'un capteur de pression pouvant mesurer la pression atmosphérique entre 1 et 1 500 Pa, et pour finir un anémomètre pour mesurer la vitesse et la direction des vents. La température moyenne sur Mars est de −63 °C comparer aux 15 à 18 °C sur Terre. Plus bas nous retrouvons le radar à pénétration RoSPR (Rover-mounted Subsurface Penetrating Radar) situé à l'avant du rover juste sous le capot avec deux antenne de détection perchées à l'horizontale. Ce radar dispose de deux canaux, un canal pour les basses fréquences et un deuxième pour les hautes fréquences. Le premier canal utilise une fréquence centrale de 55 MHz avec une largeur de bande comprise entre 35 MHz et 75 MHz. Il est capable de détecter la glace d'eau jusqu'à une profondeur de 100 mètres, et d'étudier la structure du sol jusqu'à une profondeur de 10 mètres avec une résolution de 1 mètre. Le second canal utilise une fréquence centrale de 1,3 GHz avec une largeur de bande comprise entre 0,8 GHz et 1,8 GHz. Il est capable d'étudier la glace d'eau jusqu'à 10 mètres de profondeur et le sol jusqu'à 3 mètres, avec une résolution de l'ordre du centimètre. Le radar à pénétration (RoSPR) du rover peut-être utilisé en tandem avec l'instrument MOSIR embarqué à bord de l'orbiteur pour y faire des études combinées.

Le dernier instrument faisant partie de la charge utile scientifique de Zhurong est le spectromètre imager infrarouge MarSCoDe ou détecteur de composition de surface de Mars (Mars Surface Composition Detection Package). L'instrument composé de 5 sous modules est utilisé pour détecter et analyser les compositions chimiques élémentaires des sols et des roches se trouvant à la surface martienne. Un premier sous ensemble abrite un laser et un spectromètre infrarouge qui utilise la technique d'analyse spectroscopique à claquage induit par laser (LIBS, analyse spectroscopique active), fonctionnant sur une bande de réception comprise entre 240 et 850 nm, divisé en trois canaux (240−340 nm, 340−540 nm et 540−850 nm) avec une résolution spectrales de 0,067 nm, 0,133 nm et de 0,2 nm respectivement. Un deuxième spectromètre infrarouge à ondes courtes (SWIR) fait également partie de l'unité de détection, il mesure le spectre de réflectance (analyse spectroscopique passive) fonctionnant sur une gamme spectrale de 850 à 2400 nm pouvant couvrir les principales caractéristiques d'absorption des silicates et des minéraux hydratés. Les spectres solaires réfléchis par les matériaux ciblés à la surface sont collectée par le miroir de pointage 2D avant d'être acheminé vers le spectromètre SWIR de l'unité de détection MarSCoDe situé à l'intérieur du rover. L'instrument est également équipé d'un micro-imageur télescopique (TMI) capable d'obtenir des images d'une résolution de 0,3 mm par pixel (900-1000 nm), suivit d'un miroir de pointage 2D orientable monté sur la partie supérieur avant du pont du rover servant à pointer avec précision le laser vers la cible et d'en recevoir la lumière d'émission. Et pour finir l'appareil est munie d'une cible d'étalonnage composée de 12 disques cylindriques. Les signaux LIBS et SWIR reçus sont importés dans le spectromètre via deux fibres optiques. La technique d'analyse spectroscopique à claquage induit par laser (LIBS) consiste a tiré sur une cible de roche avec un laser pulsé jusqu'à 10 mètres de distance, ce qui provoque la fusion de la couche superficielle tout en générant un nuage de plasma. La lumière de désexcitation émise dans l'infrarouge du plasma est ensuite collectée par le miroir de pointage 2D pour être étudiée par l'un des spectromètres pour en déduire la composition de l'échantillon.

Le Transite vers Mars et Atterrissage :

Figure 5 : Lancement de Tianwen -1 (Crédit : CASC/Wang Lei)

La mission a été lancée avec succès le 23 juillet 2020 à 4h41 (UTC : Temps Universel Coordonné), depuis le centre spatial de Wenchang de la république de Chine situé sur l'île d'Hainan à bord du lanceur lourd Longue Marche 5 Y-4, le plus puissant lanceur chinois de l'époque (Figure 5). Durant le transite spatial vers Mars, Tianwen-1 effectuera cinq manœuvres de correction de trajectoire (TCM, trajectory correction maneuver). La première manœuvre de correction de trajectoire (TCM-1) a lieu le 2 août 2020 à 23h00 UTC (07h00 heure de Pékin) à 3 millions de kilomètres de distance de la Terre avec l'allumage du moteur principal de 3 kN (3000 Newton) de Tianwen-1 pendant environ 25 secondes (Figure 7)[4]. Durant le trajet vers Mars le 19 août à 15h20 GMT à plus de 8,23 millions de kilomètres de la Terre. Les ingénieurs de la mission ont effectués des testes sur le magnétomètre (MOMAG), le spectromètre minéralogie (MMS) et les caméras de télédétection moyenne (MoRIC) et haute résolution (HiRIC). Un mois plus tard, la deuxième manœuvre de correction de trajectoire (TCM-2) est exécutée le 20 septembre 2020 à 15h00 UTC (23h00 heure de Pékin), avec l'allumage de quatre de ses propulseurs de contrôle d'altitude de 120 Newton sur les huit au total durant 20 secondes. La sonde qui était alors dans l'espace depuis 60 jours et parcouru 160 millions de kilomètres dans une trajectoire de transfert vers la planète rouge, se trouvait à plus de 19 millions de kilomètres de la Terre.

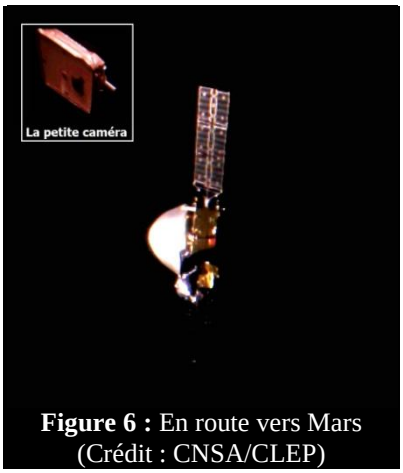


Figure 6 : En route vers Mars (Crédit : CNSA/CLEP)

Dix semaines après le lancement le 1er octobre 2020, la CNSA (Agence spatiale nationale chinoise) pour célébrer la fête nationale chinoise a publié une image de Tianwen-1 durant son trajet dans l'espace lointain vers Mars à environ 24 millions de kilomètres (Figure 6). Cette photo est une première, car c'était la première fois qu'une sonde spatiale faisant route seule vers Mars était photographiée durant sa croisière interplanétaire. L'image montre Tianwen-1 avec ses panneaux solaires déployés dans l'obscurité profonde de l'espace. Le selfie a été pris par une petite caméra jetable avec objectif grand-angle situés de chaque côté possédant une liaison super WiFi alimentées par batterie. Lancée depuis le vaisseau spatial, la caméra ultra puissante pouvait atteindre une communication sans fil (WiFi) sur une distance de 400 mètres. L'image a été prise à 15 mètres de distance de la sonde Tianwen-1, et faisait partie d'une séquence de prise de vue (une par seconde) pour augmenter la chance d'avoir un cadrage en pleine vue du vaisseau spatiale, et ceci malgré le mouvement chaotique de la caméra à la dérive dans l'espace.

[4] Mise à jour de l'orbite de télédétection de Tianwen-1, Daniel Estévez, Radio amateur scientifique et technique

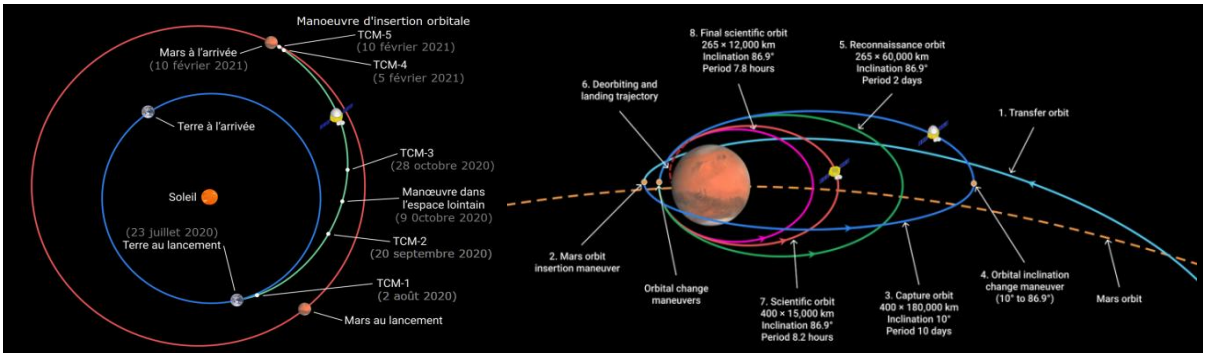


Figure 7 : Manœuvres de transfert d'orbite, de correction de trajectoire (TCM) et d'insertion orbitale (Crédit : Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0)

La sonde Tianwen-1 devait ensuite exécuter une manœuvre de correction de trajectoire de grande ampleur dans l'espace lointain avant de poursuivre sa course véritable en direction de la planète Mars. Le 9 octobre 2020 à 15h00 UTC (23h00 heure de Pékin) sous le contrôle de l'équipe de mission, le moteur principal de la sonde Tianwen-1 s'est allumé pendant plus de 8 minutes, terminant avec succès la manœuvre de correction de trajectoire dans l'espace lointain (deep space maneuver). La sonde se situait alors à environ 29,4 millions de kilomètres de la Terre, et avait parcourus plus de 210 millions de kilomètres depuis son décollage. Une troisième manœuvre de correction de trajectoire (TCM-3) à lieu le 28 octobre 2020 à 14h00 UTC lorsque l'orbiteur a allumé simultanément ses huit propulseurs durant 42,8 sec, testant à la même occasion leur bon fonctionnement. La sonde était alors dans l'espace depuis 97 jours et se trouvait à 44 millions de kilomètres de distance de la Terre, mais avait déjà parcourus 256 millions de kilomètres depuis son décollage. La quatrième manœuvre de correction de trajectoire (TCM-4) a été accomplie le 5 février 2021 à 12h00 UTC, la sonde se trouvait à 184 millions de kilomètres de la Terre et à seulement 1,1 million de kilomètres de la planète Mars. Il s'était alors écoulé 167 jours depuis le lancement et elle avait parcouru plus de 465 millions de kilomètres dans l'espace.

Après avoir franchit plus de 475 millions de kilomètres en 172 jours (6 mois et 18 jours) dans le vide et la froideur de l'espace lointain. La sonde spatiale se trouvant à plus de 193 millions de km de la Terre, allume ses rétrofusées de freinage durant 14,8 minutes à 11h52 UTC le 10 février 2021 (TCM-5) pour ralentir sa course, dans le but d'être capturer par le champ de gravité martien et de s'insérer sur une orbite équatoriale très elliptique de 400x180 000 km (périastre et apoastre) autour de la planète Mars. Contrairement aux missions précédentes qui suivent une trajectoire balistique directe depuis la terre, avec un point d'entrée fixée d'avance sur la zone d'atterrissage afin d'amorcer directement la phase d'entrée atmosphérique. La sonde Tianwen-1 est placée sur une orbite temporaire le temps de sélectionner et de certifier un site d'atterrissage, et devra par la suite exécuter une manœuvre de désorbitation. Cette manœuvre consiste à placer la sonde Tianwen-1 avec le module d'atterrissage sur une trajectoire de collision avec la planète rouge. L'Orbiteur va ensuite effectuer différentes manœuvres d'ajustement orbital durant les jours suivant pour passer sur une orbite polaire, et utiliser ses caméras de haute résolution pour faire le recherche d'un site d'atterrissage nominal pour l'atterrisseur et le rover.

La séquence d'ajustement pour faire la transition orbitale vers une orbite polaire, débute avec l'allumage du moteur principal de l'Orbiteur durant plus de 2 minutes vers 9h UTC le 15 février 2021. La séquence provoque un changement majeur de l'inclinaison de l'orbite qui passe

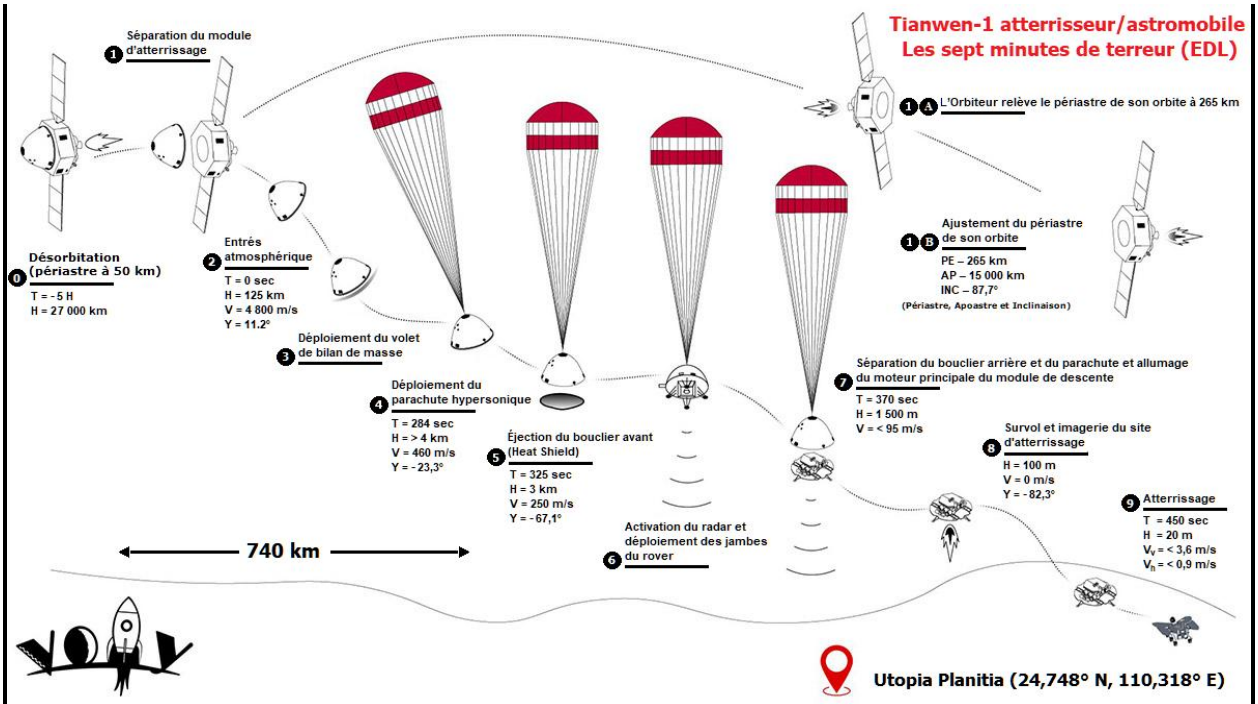


Figure 8: Les sept minutes de terreur lors de la séquence d'atterrissage (Crédit : Vony)

de 10° à 86,9° avec une altitude (périastre) passant de 400 km à 280 km avec un apoastre de 84 600 km. Le lendemain la sonde Tianwen-1 déploie et commence à tester ses différents instruments scientifiques. Le 20 février 2021, l'Orbiteur commence à diminuer l'apogée de son orbite autour de la planète Mars pour ce placer sur une orbite de stationnement et de reconnaissance plus basse de 265 km d'altitude avec un apoastre de 60 000 km. La période orbitale est passée de 10 jours à seulement 2 jours pour une orbite complète. Deux mois plus tard sur Terre, le rover de la mission Tianwen-1 a reçu officiellement le nom de Zhurong (l'ancien dieu chinois du feu) le 24 avril.

Après trois mois d'inspection détaillée de la zone d'atterrissage présélectionnée depuis une orbite de reconnaissance. La sonde Tianwen-1 se lance dans une manœuvre de désorbitation environ cinq heures avant l'atterrissage (Figure 8), le temps pour les opérateurs de la mission de pouvoir annuler l'opération en cas de besoin. La manœuvre consiste à donner une trajectoire de collision avec la planète avec un périastre d'environ 50 km d'altitude, dans le but de pouvoir larguer le module d'atterrissage et d'allumer ensuite son moteurs de propulsion principal pour reprendre de l'altitude et de se placer sur une nouvelle orbite plus sécuritaire. La capsule d'atterrissage est libérée durant la phase finale de cette manœuvre pour amorcer sa descente vers la surface de Mars. La mise en œuvre de la technique d'atterrissage avec rétropropulsion à poussée variable assisté par télémétrie radars, a été inspiré par les succès des programmes d'exploration lunaire chinois Chang'E 3 et 4. La phase d'entrée, de descente et d'atterrissage (EDL) est très importante, elle commence à l'interface de l'atmosphère de Mars à une altitude d'environ 125 km et se termine par l'atterrissage en surface. Il s'agit des sept minutes de terreur tend redoutée, et ceci en raison du retard important des communications entre Mars et la Terre (environ 18 minutes). Le système de guidage, de navigation et de contrôle (GNC[5]) doit-être

[5] The Tianwen-1 Guidance, Navigation, and Control for Mars Entry, Descent, and Landing, 16 Oct 2021

effectué entièrement en mode automatisé, il est centré sur différents déclencheurs d'événements qui fournissent des clés fiables sur l'estimation de la trajectoire et de l'attitude qui peuvent garantir le succès de l'atterrissage.

Le 14 mai 2021 vers 17h UTC, l'Orbiteur qui se trouve alors à plus de 318 millions de km de la Terre met à feu son moteur principal pour faire une manœuvre de désorbitation, qui a pour objectif de placer et de larguer la capsule de descente contenant l'atterrisseur et l'astromobile dans une trajectoire de rentrée (Figure 8). La phase d'entrée dans l'atmosphère martienne (Sol 0) débute trois heures après la séparation avec l'Orbiteur à 125 km d'altitude, par une phase d'aérofreinage sous bouclier thermique pour ralentir la vitesse. Le module de descente atmosphérique est également muni de petits ailerons latéraux qui augmente sa portance, et qui permettes d'ajuster son angle d'attaque. Le bouclier thermique s'échauffe sous la friction de l'atmosphère à une vitesse de 4,8 km/s jusqu'à atteindre 1 200 °C. La chaleur maximale sur le bouclier thermique avant (Heat Shield) de l'atterrisseur est atteinte à 1 minute 40 secondes à environ 40 km au-dessus de Mars. Grâce au freinage fourni par la friction du bouclier thermique avec l'atmosphère, les atterrisseurs parviennent à perdre plus de 90 % de leur vitesse. Quand le module de descente atteint une vitesse d'environ 460 m/s à une altitude d'environ 4 kilomètres, le parachute supersonique est déployé à 4 minutes 44 secondes pour continuer à ralentir la vitesse de l'atterrisseur. À 5 minutes 25 secondes, le module de descente atmosphérique se sépare de son bouclier avant (Heat Shield), et l'atterrisseur poursuit sa descente vers le sol à une vitesse de 250 m/s.

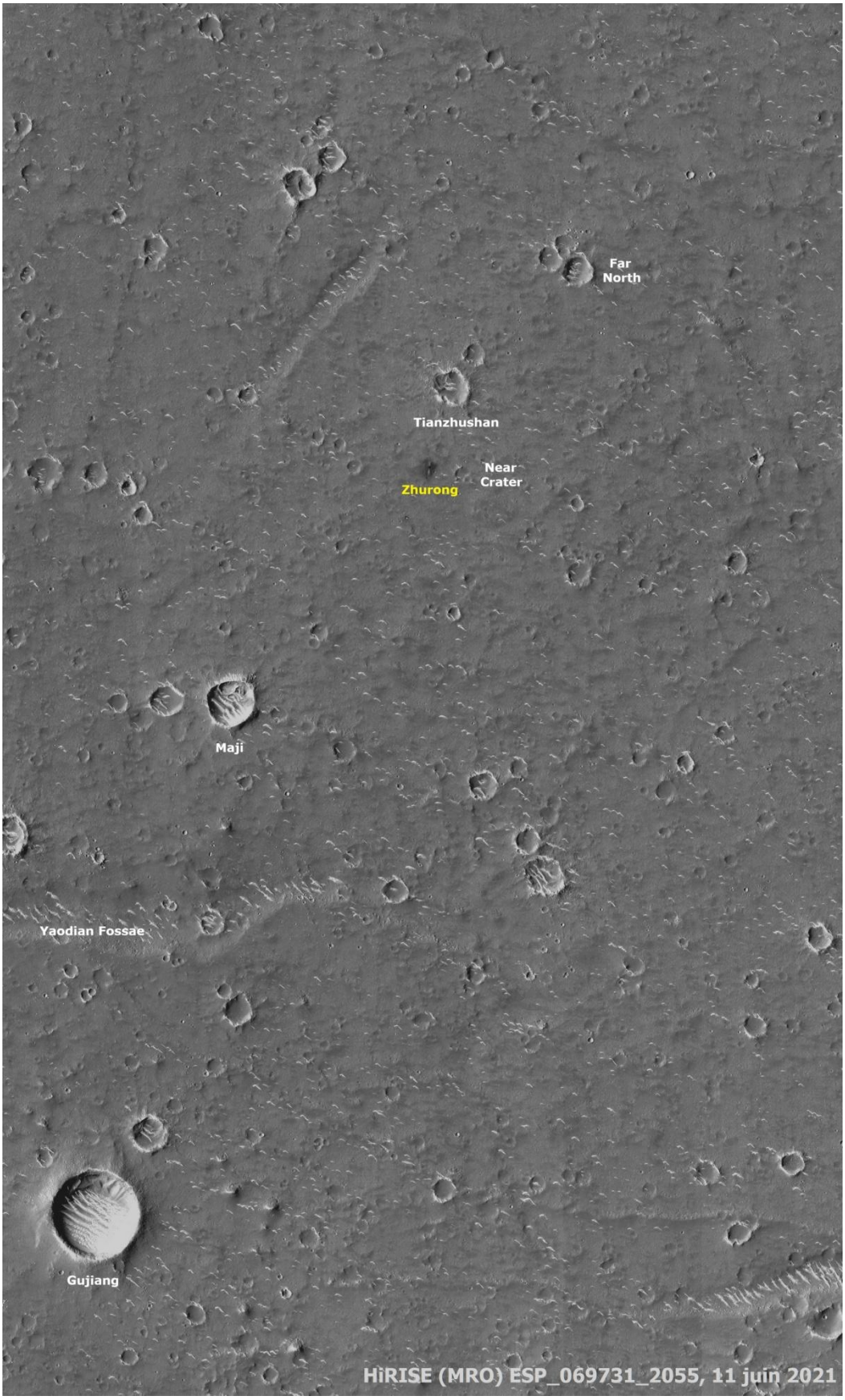
L'éjection du bouclier avant à libéré l'espace se trouvant sous le module d'atterrissage, ce qui permet de déclencher le déploiement des quatre patins d'atterrissage du rover, et d'activer les deux radars télémétrique de contrôle de la descente ainsi que la caméra qui prend des images 2D. Les radars commencent à sonder la surface et à mesurer l'altitude et la vitesse du véhicule par rapport à Mars, tout en exécutant des manœuvres d'évitements de dangers à la rechercher de la zone du site d'atterrissage. Après une chute de 370 secondes (6 mn 10 sec), l'atterrisseur largue le parachute supersonique et le bouclier thermique arrière (Back Shell) à environ 1 500 mètres au-dessus de la surface. L'atterrisseur allume alors son moteur d'atterrissage principal pour freiner sa chute et pour effectuer le reste de la descente en mode motorisé, qui fait partie du système de rétropropulsion à inversion de poussée, et commence a effectuées des manœuvres d'évitements pour ne pas entré en collision avec le parachute ou la coque arrière (Figure 8 B). Le mode de décélération motorisée commence avec la séparation de la coque arrière et se termine avant le vol stationnaire.

Figure 8 B : Vol stationnaire
(Crédit : CNSA)

Après avoir identifié un site d'atterrissage sûr, l'atterrisseur exécute et maintient un vol stationnaire suspendu dans les airs à environ 100 mètres du sol, et profite de l'occasion pour faire les dernières observations de la surface avec son imagerie radar 3D pour déterminé le site d'atterrissage final, tout en ajustant constamment sa position grâce à la télémétrie laser à micro-ondes. Le logiciel de bord ayant la possibilité de comparer les images numérisées prises du sol avec les relevés des mesures de télémétries laser, pour donner des images du sol en trois dimensions durant le vol stationnaire. Il est également charger de sélectionner le meilleur site dégagé possible et d'atterrir en douceur en mode

« évitement d’obstacles ». Pour ce faire, le module d’atterrissage dispose de 26 propulseurs d’ajustement d’altitude qui l’aide à se stabilisé verticalement et à se déplacer horizontalement. Le module descend ensuite jusqu’à 20 mètres de la surface et amorce la phase final qui consiste à une descente lente jusqu’au sol.

Durant ce temps, l'Orbiteur fait une nouvelle mise à feu de ses moteurs pour éviter la collision avec Mars, et pour se place sur une orbite polaire elliptique scientifique de 400x15 000 km d’altitude d’une période de 8,2 heures. L’Orbiteur fera par la suite différent ajustement durant les mois suivants pour se place sur une orbite polaire elliptique finale de télédétection de 265x12 000 km avec une période de 7,8 heures (8 novembre 2021). À partir de laquelle il va effectuer des mesures scientifiques de télédétection et de continuer à servir de relais pour les communications du rover avec la Terre.


Far
North
Tianzhushan
Near
Crater
Zhurong
Maji
Yaodian Fossae
Gujiang
HiRISE (MRO) ESP_069731_2055, 11 juin 2021

DURÉE NOMINALE DE LA MISSION (Sol 1 à 90)

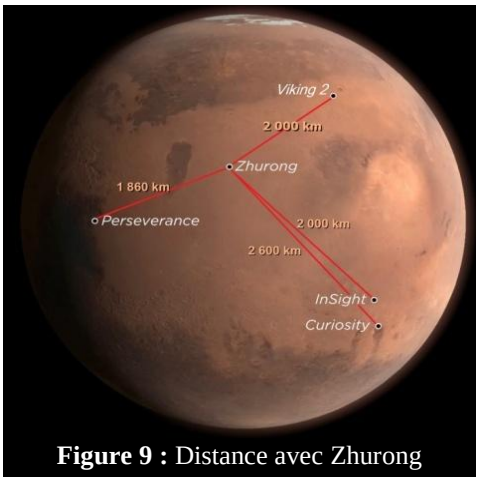


Figure 9 : Distance avec Zhurong

Après avoir passé 265 jours (9 mois et 22 jours) dans la noirceur et la froideur de l'espace interplanétaire depuis son départ de la Terre, et après avoir survécu aux 7 minutes et 30 secondes de terreur lors de la descente dans l'atmosphère martienne. Le module d'atterrissage de Tianwen-1 se pose avec succès à la surface de la planète Mars le 14 mai 2021 à 23h18 UTC (10h40 heure de Pékin), dans la région sud d'Utopia Planitia à 25,1° de latitude Nord par 109,9° de longitude Est à 33 km du centre de la zone de l'ellipse nominale initialement prévu. La plateforme d'atterrissage de Tianwen-1 avec le rover Zhurong en position repliée avant déploiement, s'est posé à plus de 1 860 kilomètres au nord-est du site d'atterrissage de l'astromobile Perseverance (Figure 9) de la mission américaine Mars 2020 (développé dans le chapitre suivant), situé dans le cratère Jezero depuis près de 3 mois (18 février 2021), et à plus de 2 000 kilomètres au nord-ouest du site de l'atterrisseur InSight qui était en activité sur Mars dans Elysium Planitia depuis 2 ans et 7 semaines (26 novembre 2018). Et pour finir cette courte énumération, le module d'atterrissage de Tianwen-1 s'est posée à plus de 2 600 kilomètres au nord-ouest du rover Curiosity, qui était toujours en activité à cette époque (Sol 3118 de sa mission) dans le cratère Gale depuis 8 ans et 10 mois (6 août 2012).

Le site d'atterrissage est situé au sein d'une unité géologique datant de la fin de l'Hespérien (période située entre 3,5 et 2,0 milliards d'années) à une altitude de −4 099,4 mètres appelée la Formation Vastitas Borealis (VBF). Il s'agit de l'une des unités sédimentaires les plus répandues sur Mars couvrant la plupart des plaines bases du nord. La limite VBF ressemble beaucoup au rivage d'un ancien océan potentiel en raison des falaises séparant les hautes terres du sud et des plaines basses du nord[6], offrant une fenêtre unique sur l'histoire évolutive des basses terres martiennes. Le module d'atterrissage Tianwen-1 s'est posé à 40 mètres au nord-ouest d'un petit cratère d'une vingtaine de mètres de diamètre, et à plus de 400 mètres au sud-ouest d'un plus gros cratère d'une centaine de mètres de diamètre présentant des éminences claires (dunes). L'information du succès de l'opération nous parviendra que 17 minutes plus tard, le temps au signal radio de franchir les 318 millions de kilomètres qui séparait alors Mars de la Terre au moment de l'atterrissage. Et pour la première fois dans l'histoire de l'exploration spatiale, il y avait quatre missions active en même temps sur le sol de la planète Mars (Curiosity, InSight, Perseverance et maintenant Zhurong).

[6] Aqueous alteration of the Vastitas Borealis Formation at the Tianwen-1 landing site (2022)

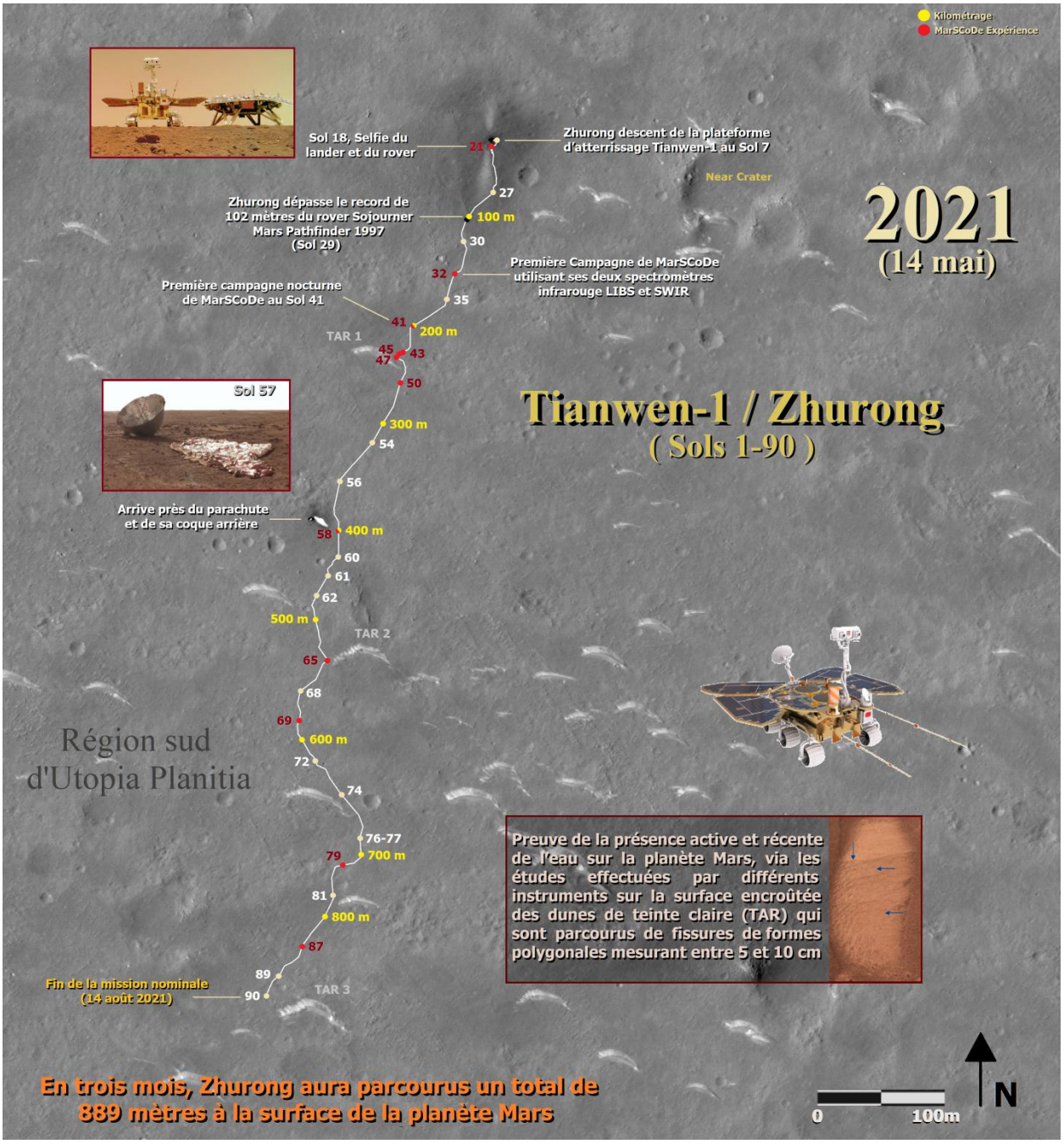


Planche 2 : Carte du trajet de l'astromobile chinois Zhurong entre les Sols 1 et 90. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) à 288.8 km d'altitude le 11 Juin 2021. Position et trajet des rovers guidés par les cartes de la Nasa et de Philip J. Stooke.

La région d'Utopia Planitia est aujourd'hui une vaste plaine considérée comme étant le plus grand bassin d'impact du système solaire d'un diamètre de 3 300 km et âgé d'environ 4 milliards d'années, témoignant que quelque chose de vraiment énorme à jadis frappé la planète Mars, laissant derrière un vestige qui ressemble à un vaste océan (Planche 3). La Chine devenant ainsi la troisième puissance spatiale à parvenir à se poser en douceur sur la planète Mars après l'Union Soviétique et les États-Unis, et la seconde après les États-Unis à y opérer un rover avec succès. L'astromobile Zhurong est ainsi devenu le sixième rover à faire tourner ses roues à la

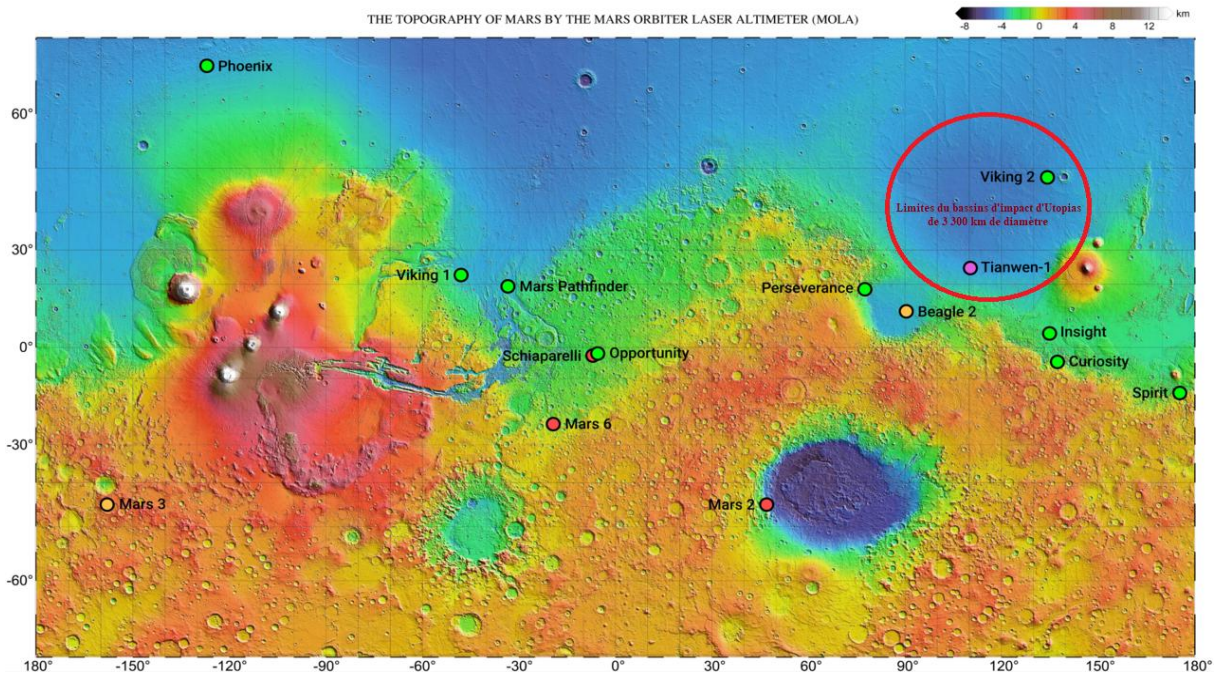


Planche 3 : Représentation d'un ancien océan dans les plaines du Nord suivant le tracer de la dichotomie martienne. Le rover est situé à environ 300 km au nord de cette limite (Crédit : NASA/JPL/GSFC)

surface accidentée de la planète rouge après Sojourner, Spirit, Opportunity, Curiosity et Perseverance. Et le sixième pays à avoir à cette époque une sonde active en orbite autour de la planète rouge. À cette époque la planète Mars s'approchait de l'aphélie, soit le point de son orbite le plus éloigné du soleil, et l'hémisphère Nord favorisé par l'axe d'inclinaison de la planète qui est alors orienté vers le soleil, se préparait à entrer en saison estivale avec l'arrivé du solstice d'été prévu deux mois plus tard le 25 août 2021. Tandis que l'hémisphère Sud se préparait à entrer en saison hivernale. Dans l'hémisphère Nord de la planète, l'été dure en moyenne 178,6 jours (Sols) et de 154 jours (Sols) pour l'hiver.

Cause des changements climatiques : Selon les paramètres orbitaux au passage de l'aphélie, quand l'axe d'inclinaison (ou de rotation) du pôle Sud de la planète pointe en direction opposée du soleil sur le point de l'orbite le plus éloigné de l'astre du jour (Sol !). Les températures rencontrées dans l'hémisphère Sud de la planète sont alors parmi les plus froides. La situation est cependant inversée pour le pôle Nord avec des contrastes de température saisonnier moins élevé. C'est l'axe d'inclinaison (l'obliquité) de la planète et la distance au Soleil qui définit l'ampleur des saisons et de la quantité d'énergie solaire reçus. La situation est cependant inversée lors du passage de la planète au point le plus proche de son orbite (périhélie) situé de l'autre côté du disque solaire (comme par exemple lors de l'arrivé du solstice d'hiver dans l'hémisphère Nord prévus l'année suivante vers le 21 juillet 2022). L'axe d'inclinaison (25,19°) du pôle Sud pointe alors directement vers le Soleil juste après l'arrivé de son solstice d'été, et reçoit 40 % plus d'énergie que le pôle Nord à l'aphélie. Les températures estivales sont alors parmi les plus chaudes rencontrées sur la planète. C'est ce contraste des paramètres orbitaux qui distingue les deux pôles de la planète, avec au Nord une couche des glace d'eau plus épaisse et au Sud une couche de glace d'eau plus mince recouvrant une couche de glace de CO_2 plus épaisse, car étant dans un environnement plus froide.

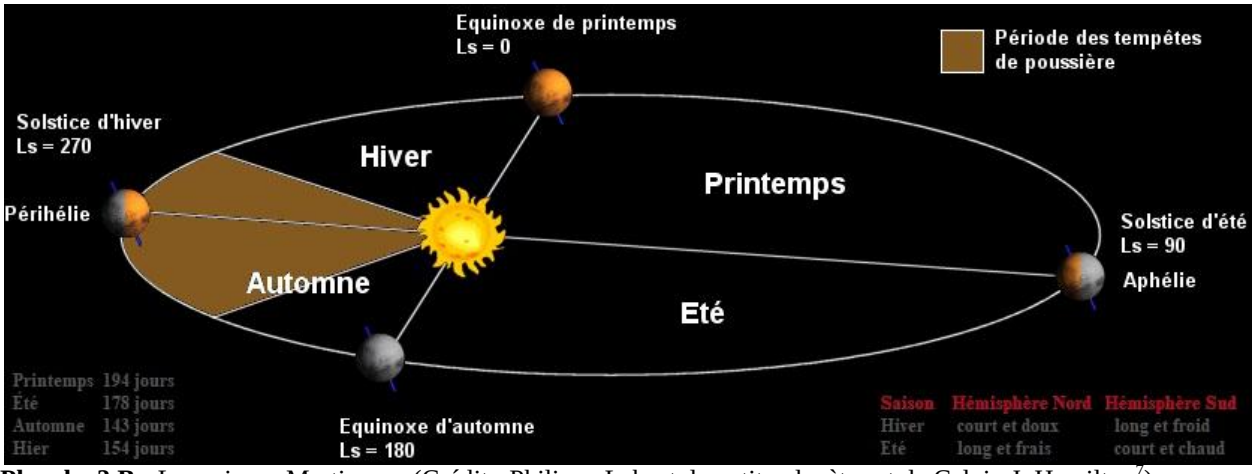


Planche 3 B : Les saisons Martiennes (Crédit : Philippe Labrot, la petite planète est de Calvin J. Hamilton[7])

La différence de température et la différence de pression atmosphère saisonnière de plus de 20% que subit la planète entre ses deux pôles durant une année martienne, participe à l'émergence des tempêtes de poussières régional et global pouvant recouvrir toute la surface de Mars. Les hivers sont donc relativement doux et courts dans l'hémisphère Nord, mais longs et plus froids dans l'hémisphère sud. C'est la rotation de cet axe d'inclinaison de la planète dessinant un cône dans l'espace de façon cyclique, phénomène dénommé précession des équinoxes ou précession climatique d'une durée de 170 000 ans[8]. Combiné en résonance avec le cycle de la forte variation de l'excentricité de l'orbite (0,09332 contre 0,01671 pour la Terre) variant de 0,002 à 0,103 sur une période de 100 000 ans, et du cycle sur la variation de l'inclinaison de l'obliquité variant entre 14,9° et 35,5° en 124 000 ans. C'est l'interaction et la résonance de ses trois grands cycles astronomique de longue durée, ou cycles de Milankovitch sur Mars, qui participe aux grandes variations du bilan d'énergie et de l'insolation solaire reçu sur la planète, et qui marque les grands bouleversements brusque et cycliques des changements climatiques qui ont marquées l'histoire ancienne et récente de la planète Mars. Comme semble le démontrer les différentes zones de débâcles et d'effondrements, les cratères lobés ainsi que d'autres formation géologiques observées sur Mars depuis l'espace.

Le rover Zhurong déploie ensuite en mode automatique le mât sur lequel sont installées les caméras de navigation et de terrain NaTeCam et la caméra multispectrale MSCam. Puis s'est le tour des quatre panneaux solaires en forme d'aile de papillon et de l'antenne parabolique à grand gain. Durant les 3 jours (Sols) suivant, l'astromobile de 240 kg (530 lb) et de 1,85 mètre de haut va orienter l'antenne parabolique grand gain dans le but d'établir un lien de télécommunication avec l'orbiteur pour communiquer son statut à la Terre. L'atterrisseur déplorera également les deux rails qui serviront au robot de rampe de descende pour rejoindre la surface, et les deux antennes du radar à pénétration de sol RoSPR. La 1ère communication en bande X entre l'orbiteur Tianwen-1 et le rover Zhurong a été effectué le 17 mai, et les premières images sont rendus publiques que 4 Sols plus tard le 19 mai. La figure 10 est la première image prise par l'une des caméras de navigation avant à grand angle (Front HazCam) destinée à détecter les obstacles situé sous le capot du rover. Cette première photo montre que les panneaux solaires du robot et les rampes d'accès de l'atterrisseur ce sont déployée correctement. Le paysage est

[7] Le Cycle des saisons, Philippe Labrot
[8] Exploration spatial, Le blog de Pierre Brisson : cycles de Milankovitch pour Mars

plat, parsemé ici et là de quelques petits cailloux et de sable fin faisant office de seul relief visible à l'horizon de cette vaste plaine rougeâtre et poussiéreuse d'Utopia Planitia. Aucun rocher de grosse taille ne se distingue dans les environs immédiats du site d'atterrissage, un paysage qui ressemble étrangement à celui observé sur les sites d'atterrissage du rover Spirit ou de l'atterrisseur InSight situé plus au Sud.

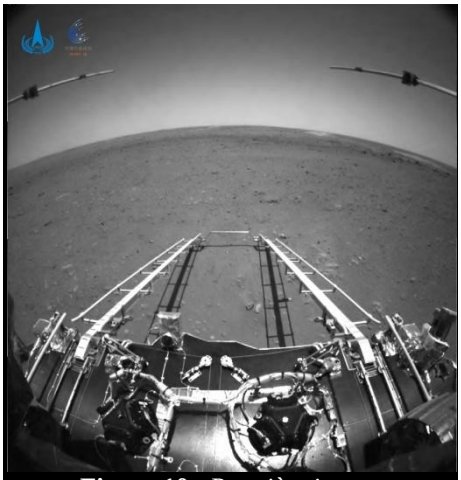


Figure 10 : Première image
(Crédit : CNSA)

Ce long délai pour la transmission des images s'explique principalement par le fait que l'orbiteur, qui sert de relais de communication radio entre l'astromobile et la Terre (bande UHF ou X en passant par des relais orbitaux), n'était pas disponible car n'ayant pas encore atteint une orbite stable. L'orbiteur n'étant donc pas « visible » sur l'horizon, et le rover Zhurong à du communiquer directement avec la Terre en utilisant la bande UHF à faible débit (16 bit/sec) de l'antenne parabolique orientable. L'Orbiteur Tianwen-1 est le seul relai de communication dont dispose la Chine pour dialoguer avec Zhurong, et ce dernier devait effectuée une manœuvre orbitale deux jours plus tard pour passer sur une orbite plus basse de durée plus courte passant de 48 heures à 8,2 heures. Désormais positionné sur une orbite polaire de relais plus basse le 17 mai, le satellite commence à survoler directement la zone d'atterrissage du rover avec un passage à l'horizon d'une durée de 8 à 9 minutes pour pouvoir communiquer plus régulièrement avec le robot. Ce n'est qu'à partir de là qu'une communication haute fréquence a pu être établie (20 Mbits (UHF) ou à 50 Mbits en bande X). L'orbiteur Mars Express de l'Agence spatiale européenne (ESA) sera également mis à contribution plus tard au cours de la mission (en novembre 2021), pour tester les relais de transmission de soutien lors de l'envoie des données du rover.

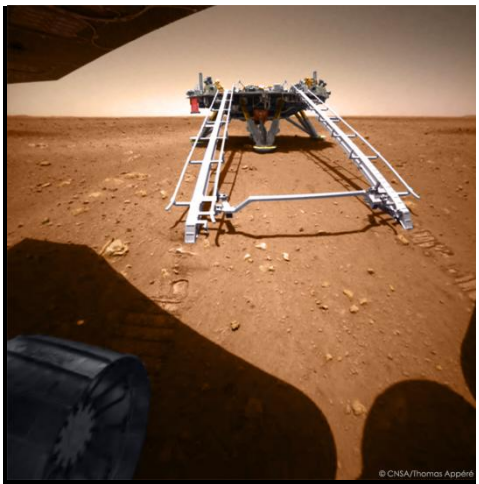


Figure 11 : Après la descente
(Crédit : CNSA/Thomas Appéré)

Le 22 mai 2021 au Sol 7 à 10h10 heure de Pékin (02h40 UTC), après une semaine de vérifications et d'analyses de l'environnement. Le rover Zhurong descend pour la première fois de la plateforme d'atterrissage pour rejoindre la surface de Mars, et d'entamer son périple d'exploration en roulant sur la planète rouge. La caméra d'évitement d'obstacle arrière gauche (Near HazCam Left) a capturée se moment historique pour la Chine (Figure 11). Le microphone situé à bord du rover et faisant partie de la station météorologique (MCS), qui vise entre autre à capturer les sons des vents martiens, a pu capter et enregistré la séquence sonore lors du déploiement du rover vers la surface. L'astromobile Perseverance n'étant plus le seul robot sur Mars à avoir réussi la prouesse d'enregistrer directement des sons à la surface de la planète Mars. L'audio comprend le bruit de frottement du mécanisme d'entraînement du robot lors de la conduite sur la rampe lors de la descente, incluant le frottement entre les roues et le sol martien. Afin de mieux s'adapter à l'environnement particulier et changeant à la surface de Mars, recouvert de dune et de cailloux de tailles différentes. Pour mesurer les déplacements et les

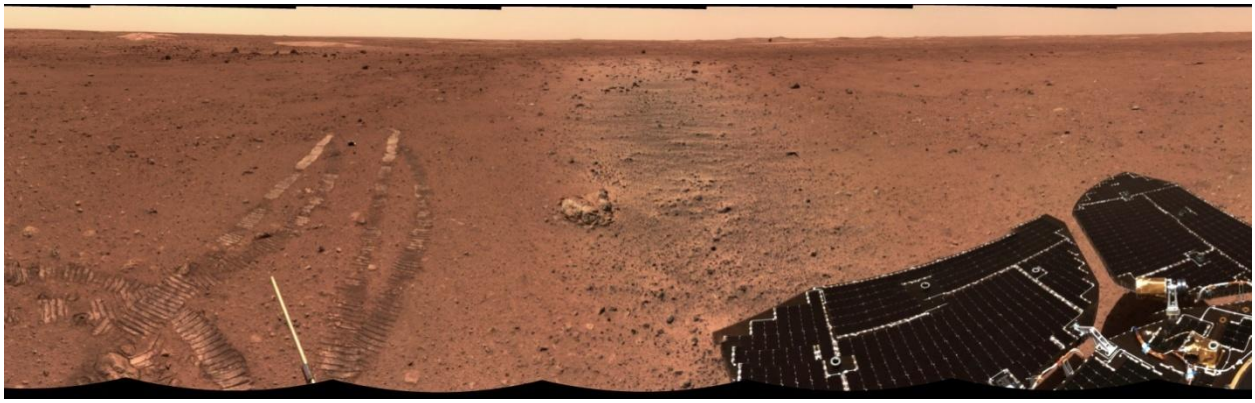


Planche 4 : Premier panorama couleur de 360° pris au Sol 20 le 3 juin 2021 (Crédit : CSA /Doug Ellison)

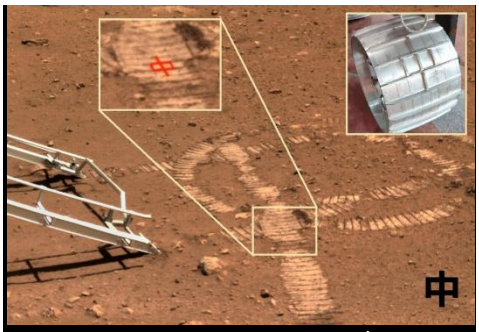


Figure 11 B : Symbole 中

Figure 11 C : Sous l'atterrisseur (Crédit : CNSA)

propriétés physiques du sol martien, le caractère chinois « 中 » a été imprimé dans les ornières des deux roues arrière du robot (Figure 11 C). Il s'agit du symbole phonétique « Zhōng » du chinois standard qui signifie « toucher la cible ». Chaque fois que le rover avance d'environ un mètre, les deux roues arrière laissent une marque « 中 » sur le sol martien. Pendant la conduite, le taux de glissement est directement lié à la sécurité du robot mobile, et pour faciliter l'analyse du patinage et la distance de conduite réelle sur le terrain, il suffit d'analyser la distance entre les caractères « 中 » sur les photos d'ornières des roues arrière. L'empruntes du caractère "中" laisser au sol sert aussi a déterminé si l'astromobile roule sur un sol dur avec un taux de glissement relativement faible, ou s'il il roule sur du sable mou et sujet à l'affaissement. Plus de 4 000 caractères « 中 » seront ainsi imprimés dans le sol martien durant la mission de Zhurong. La conduite en mode autonome de Zhurong dispose de plusieurs fonctionnalités qui permettent à l'astromobile de bien percevoir son environnement immédiat, incluant des logiciels pour la reconnaissance d'obstacles et le contrôle coordonné du mouvement des six roues motrices. Le tout est rendu possible grâce aux logiciels de modélisation numérique 3D du terrain, qui combine et analyse les données fournis par les caméras de navigation de terrain NaTeCam et les caméras d'évitement des dangers (HazCam), avec les données fourni par les mesures des capteurs télémétrique du radar à pénétration de sol RoSPR, et que le système de contrôle de la navigation du rover effectue après chaque arrêts. L'astromobile à la capacité de planifier de manière autonome de courts déplacements avec contournement d'obstacles sur de courte distance pour arpenter la surface du sol martien.

L'astromobile se met à nouveau en mouvement sur le Sol 12 (27 mai 2021), et contourne le module d'atterrissage par le sud-est dans le sens antihoraire. Certaines images prises sous l'atterrisseur de Tianwen-1 durant le trajet (Figure 11 C), dévoile l'action résultant des jets de gaz d'échappement de l'unique moteur de descente qui a creusé un trou dans le sol martien lors de la phase finale de l'atterrissage (Figure 11:B). L'astromobile exécute ensuite un court déplacement

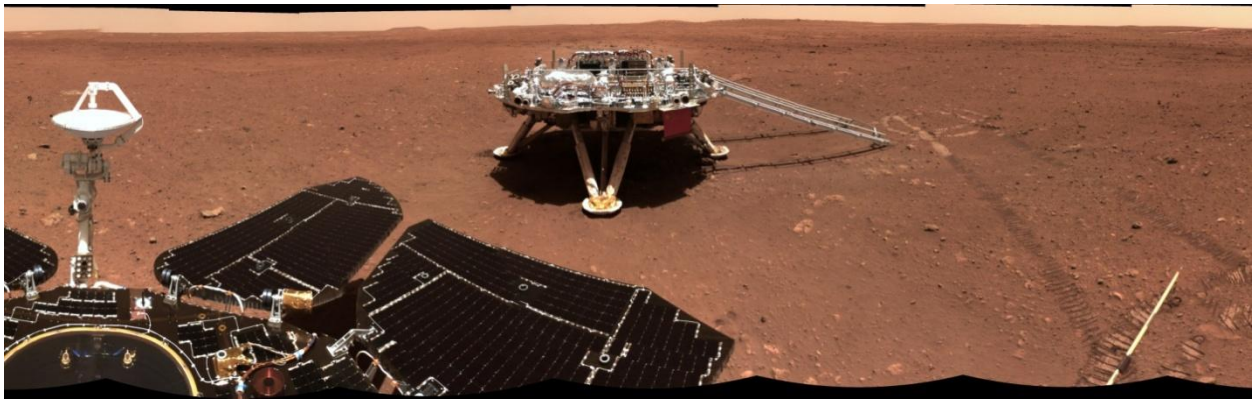


Planche 4 : Suite du premier panorama couleur de 360° pris au Sol 20 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Figure 12 : Auto portrait pris au Sol 18 (Crédit : CNSA)

vers le sud au Sol 16, et après avoir déployée et planté dans le sol martien une petite caméra Wifi commandée à distance avec une portée de 100 mètres au Sol 17. Le rover Zhurong reviens sur ses pas dès le lendemain en se déplacent vers la plateforme d'atterrissage de Tianwen-1 sur environ 10 mètres. La mini caméra installée au sol a enregistrée une séquence de plusieurs images pour documenter le mouvement de retrait du rover, incluant également les manœuvres de virage sur sa gauche. C'est une nouvelle fois une grande première dans l'histoire de l'exploration spatiale de voir ainsi en vidéo un astromobile se déplaçant librement à la surface de la planète rouge. Toujours à l'aide de mouvement de retrait du rover, incluant également les manœuvres de virage sur sa gauche. C'est une nouvelle fois une grande première dans l'histoire de l'exploration spatiale de voir ainsi en vidéo un astromobile se déplaçant librement à la surface de la planète rouge. Toujours à l'aide de la mini caméra jetable installé sur le sol martien, le rebot exécute pour la première fois un joli autoportrait (selfie) au Sol 18 le 1er juin (Figure 12), avec en arrière plan la plateforme d'atterrissage de Tianwen-1.

Figure 13 : Caméra jetable extrait de l'image de droite de la Planche 4 (Crédit : CNSA)

Deux Sols plus tard le 3 juin 2021 en début de journée vers 9 heures du matin (heure locale de Mars), le rebot transmet à la Terre le tout premier panorama couleur de 360° pris par les caméras de navigation et de terrain NaTeCam (Planche 4), la vue est une mosaïque composée de l'assemblage de 48 images plus petites. A partir de l'image de gauche du panorama en allant vers la droite, nous pouvons voir les traces de roues du rover laissé au sol pour la prise de vue du selfie, ainsi que la petite caméra jetable déposée au milieu de ceux-ci (Figure 13), suivit de l'empreinte des rétrofusées lors des derniers moments de l'atterrissage. Vers le centre de l'image de gauche, un peut décaler vers la droite de l'empreinte de la rétrofusée laissée sur le sol, nous retrouvons situé au loin sur la ligne d'horizon le parachute avec sa coque arrière (Back Shell). Dans la partie

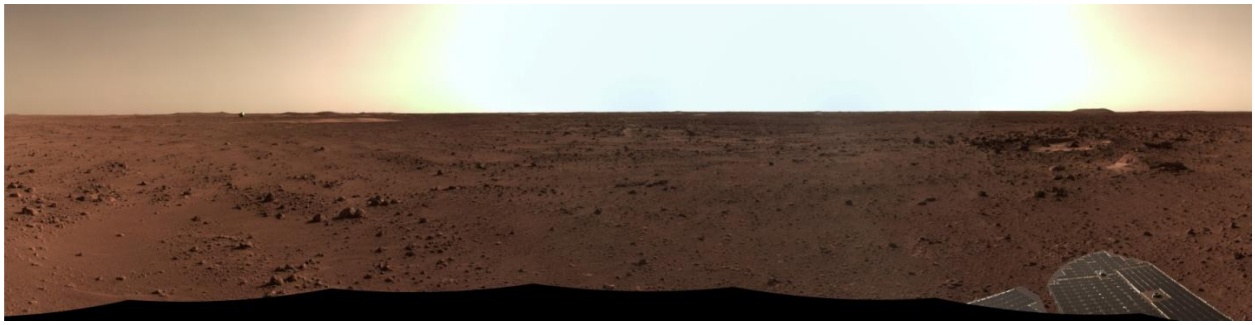


Planche 5 : Panorama de 360° pris au Sol 32 le 15 juin 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Planche 6 : Panorama de 360° pris au Sol 41 à la hauteur de TAR 1 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Planche 7 : Panorama de 360° pris au Sol 50 le 4 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

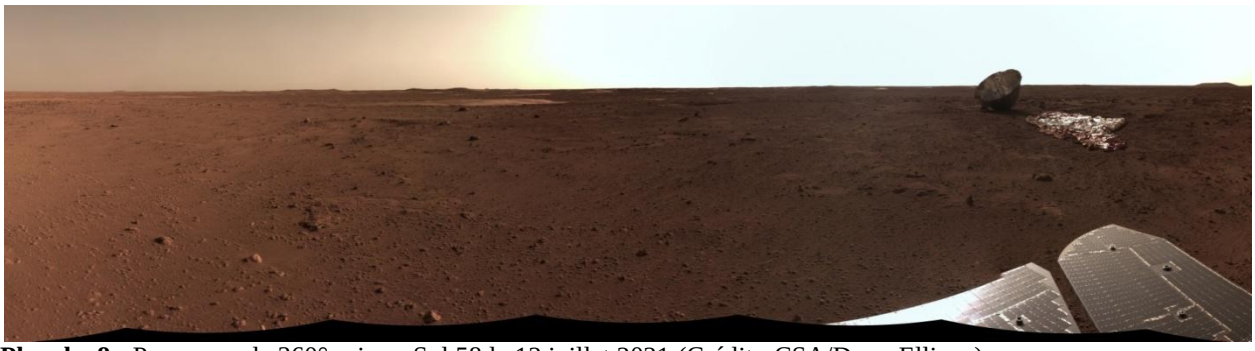


Planche 8 : Panorama de 360° pris au Sol 58 le 12 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

gauche de l'image de droite, tout juste au-dessus et à gauche de la plateforme d'atterrissage de Tianwen-1, nous retrouvons le sommet d'un volcan de boue en forme de cône (Yaodian Tholus) situé au nord-ouest à plus de 5,6 km. La première campagne d'observation du spectromètre

Planche 5 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 32 le 15 juin 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

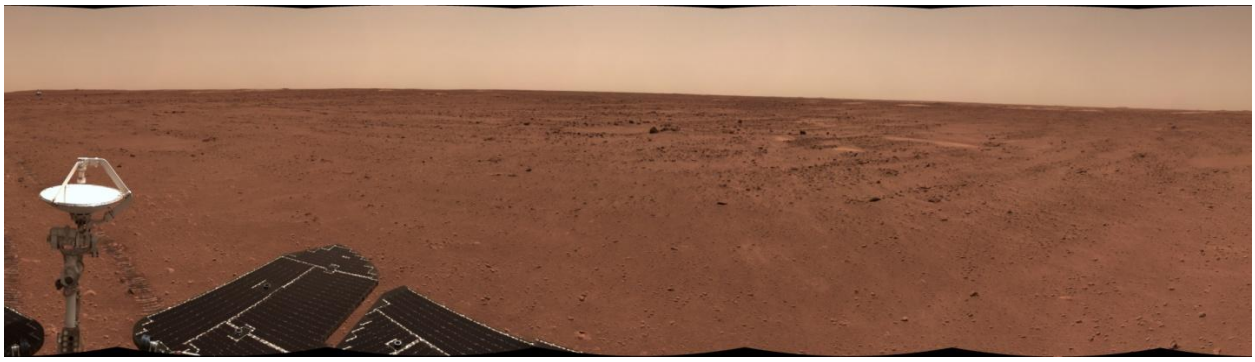


Planche 6 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 41 le 24 juin 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Planche 7 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 50 le 4 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

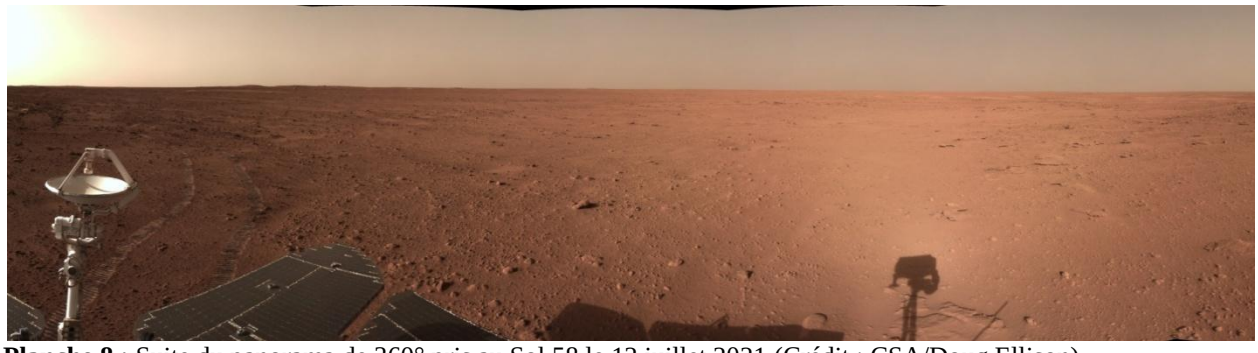


Planche 8 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 58 le 12 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

infrarouge à claquage induit par laser (LIBS) de l'unité de détection MarSCoDe (Figure 14), a été exécutée sur deux cibles de sol se trouvant à l'intérieur des traces de roues du robot au début de l'après-midi sur le Sol 21 le 4 juin 2021 (voir annexe). Le rover Zhurong se remet ensuite

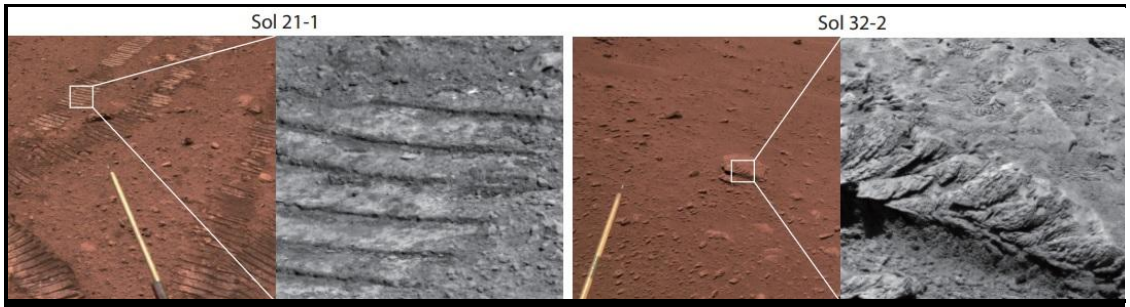


Figure 14 : Les deux premières cibles LIBS. La partie gauche de chaque image sont de la caméra NaTeCam, et la partie droite de la caméra multispectrale (MSCam). (Crédit : CNSA)

définitivement en route vers le sud à partir du Sol 22.

A chaque jour (Sol) dès le levé du soleil, le robot en profite pour recharge ses batteries et prendre quelques relevés atmosphérique de température, de la vitesse des vents et de la pression. La période de travail principale du robot est fixée en générale entre 11h00 et 15h00, lorsque la température ambiante est la plus élevée. L'astromobile Zhurong se prépare ensuite à faire une petite redonnée martienne en mode de conduite autonome sur environ 8 à 10 mètres, tout en suivant des directives générales préprogrammées d'avances et télécharger la veille via l'orbiteur Tianwen-1. Lors de la séance de conduite à la surface le radar à pénétration RoSPR peut être activé, ayant alors pour objectif de sonder la structure géologique en profondeur du sous-sol martien durant le trajet pour faire la recherche de possible nappe de glace enfouis ou d'eau très saline. Après chaque séance de conduite, le rebot prend une série d'images avec ses différentes caméras pour documenter le nouveau site d'étude et pour faire à l'occasion de magnifique image panoramique donnant sur le paysage martien traversé. Et selon les besoins, l'astromobile peut également effectuer différents mesures avec son unité de détection de composition de surface martienne (MarSCoDe), qui contient un spectromètre infrarouge à claquage induit par laser LIBS et un spectromètre infrarouge à ondes courtes SWIR conçus pour détecter les lignes d'émission élémentaires et d'obtenir des spectres de réflectance sur différentes cibles de roches et de sol. Observations qui peuvent êtres combinées avec les images prises par la caméra multispectrale MSCam, afin d'aider à identifier la composition chimique et minéralogiques des roches et des sols analysés.

Une semaine plus tard sur le Sol 29 le 11 juin 2021, l'astromobile franchit le cap de son premier cent mètres parcourus à la surface de la planète Mars. Et lors de la même séance de conduite, le rover Zhurong dépasse le record de 102 mètres parcourus par le petit robot Sojourner durant la mission de Mars Pathfinder de 1997. L'astromobile Zhurong amorce ensuite le contournement d'un petit cratère d'environ cinq mètres de diamètre par le nord-est entre les Sols 30 et 32. La seconde campagne d'expérience du spectromètre infrarouge à claquage induit par laser LIBS de l'unité de détection MarSCoDe, à lieu au Sol 32 le 15 juin 2021 à la fin de la journée. La première séance de tirs laser a été effectuée sur une cible de sol à 17h37, et la seconde séance a été effectuée sur une cible de roches à 17h49 (Figure 14)[9]. La première séance de la première campagne d'analyse effectuée par le spectromètre infrarouge à ondes courtes SWIR, a été exécutée à 17h42 sur la même cible de sol juste après les tirs laser de LIBS, dans le but de faire un relevé spectroscopique, et la deuxième séance de mesure spectroscopique a été

[9] In situ analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars, 03 March 2023

effectuée à 17h54 sur la cible de roche juste après le tir laser LIBS, évitant ainsi l'effet de la poussière. Le second panorama couleur de 360° entamé par les caméras de navigation et de terrain NaTeCam, est exécuté le même jour (Sol 32) en fin de soirée vers les 22 heures (Planche 5). Le cliché est toujours composé de l'assemblage d'une mosaïque de 48 images plus petites, qui dévoile le défilement du magnifique paysage martien en fonction de la lente progression du robot sur le terrain. Au centre de l'image nous pouvons voir le petit cratère que le rebot vient tout juste de contourner, surmonté d'un sommet en forme de cône du volcan de boue baptisé « Yaodian Tholus », et vers le centre de la partie gauche de l'image de gauche situé juste sur la ligne d'horizon, nous retrouvons le parachute avec sa coque arrière (Back Shell) étendue sur le sol martien et vers lequel se dirige l'astromobile. La plateforme d'atterrissage de Tianwen-1 est également visible au loin sous la ligne d'horizon dans la partie gauche de l'image de droite.

Une semaine plus tard sur le Sol 40 le 23 juin 2021, l'astromobile franchis la barre des 200 mètres parcourus à la surface de la planète Mars. Et le lendemain au Sol 41, le rover Zhurong entame le troisième panorama couleur de 360° de la mission avec les caméras de navigation et de terrain NaTeCam (Planche 6). Les images sont prises en fin de soirée vers les 22 heures, et le panorama est toujours le résultat de l'assemblage effectuer à partir d'une mosaïque de 48 images plus petite, pour donnée une vue donnant sur le paysage martien en suivant les lents déplacements du robot à la surface de la planète Mars. À l'approche de la première dune de dépôts éoliens de teinte claire en forme de croissant, également appelée dorsale éolienne transversale (TAR) mesurant 40 mètres de long par 8 mètres de largeur sur 0,6 mètres de hauteur, que l'on peut voir dans l'image de gauche des planches 6 et 7. Zhurong profite de cette occasion pour faire plusieurs campagnes d'analyses de cibles d'intérêts géologique avec les spectromètres infrarouges de l'unité de détection MarSCoDe.

La première campagne (troisième de la mission) est effectuée durant la nuit au Sol 41 le 25 juin 2021 (première analyse nocturne), et elle est composé de deux séances LIBS exécuté sur des cibles de sol à 3h42 et 3h54. Le rover se déplace sur de courte distance aux Sols 42 et 43, et la deuxième campagne d'analyse est effectuée cette-fois-ci par le spectromètre infrarouge à ondes courtes SWIR au Sol 43 le 26 juin 2021. Elle est composée de deux séances de mesures spectroscopiques exécutées durant la nuit à 00h35 et 00h12 (première analyse nocturne pour SWIR). La troisième campagne d'étude est composée de deux séances de tirs laser sur des cibles de sol effectuée par le spectromètre à claquage induit par laser LIBS (le quatrième de la mission) en fin de soirée à 23h28 et 23h29 (Figure 17:A). L'astromobile se positionne de nouveaux devant de nouvelles cibles d'intérêts au Sol 44, puis entame dès le lendemain (Sol 45, Figure 17:B) la quatrième campagne d'étude exécutée dans les environs de la dune TAR-1 qui sera effectuée à l'aide du spectromètre LIBS (la cinquième de la mission). La première séance de tirs laser et d'analyse est exécutée à 7h31 sur une cible de sol se trouvant sur la dune, et la seconde séance de tirs laser est effectuée à 7h43 sur une cible de roche, dont les analyses démonteront qu'il s'agit de la première et de unique roche ignée analyse par l'unité de détection MarSCoDe durant la mission sur Mars. Les phyllosilicates, tels que la smectite et la kaolinite, sont des produits de l'altération aqueuse de minéraux silicatés ignés.

L'astromobile arrive finalement à la hauteur de la première crête éolienne transversale en forme de croissant (TAR 1) qu'il rencontre sur sa route. Et il entame aussitôt une longue campagne d'étude et d'analyse des environs et du dépôt éolien de teinte blanchâtre, qui compose la surface encroûtée de la dune durant les Sols suivants (Sol 46-51 du 30 juin au 5 juillet 2021).

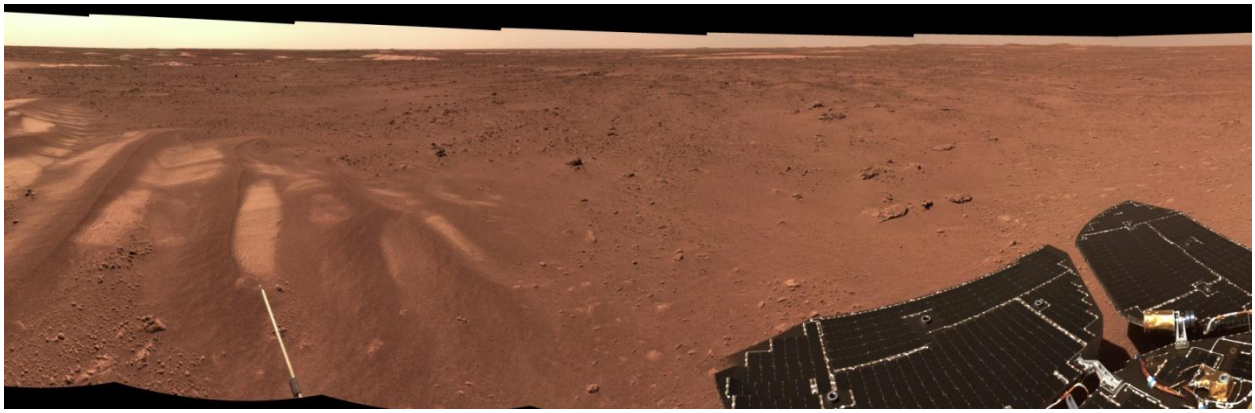


Planche 9 : Panorama de 360° pris au Sol 65 à la hauteur de TAR 2 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Planche 10 : Panorama de 360° pris au Sol 69 le 23 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Planche 11 : Panorama de 360° pris au Sol 79 le 3 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

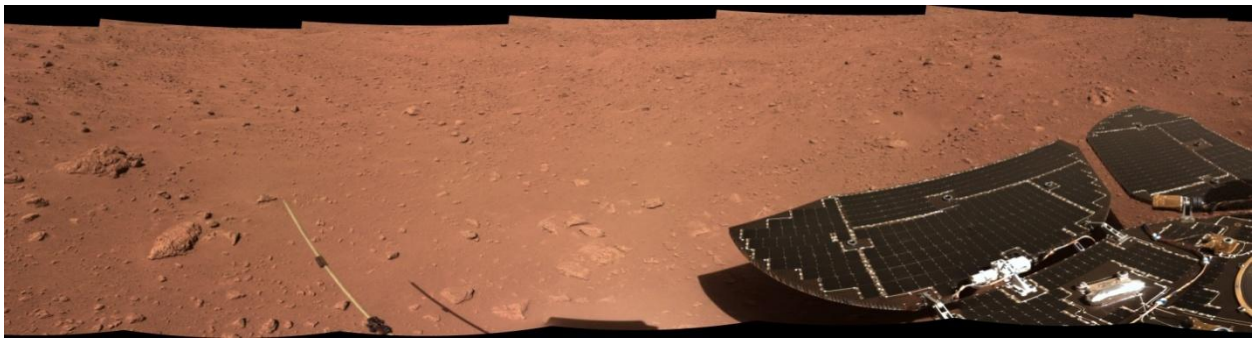


Planche 12 : Panorama de 360° pris au Sol 84 le 8 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

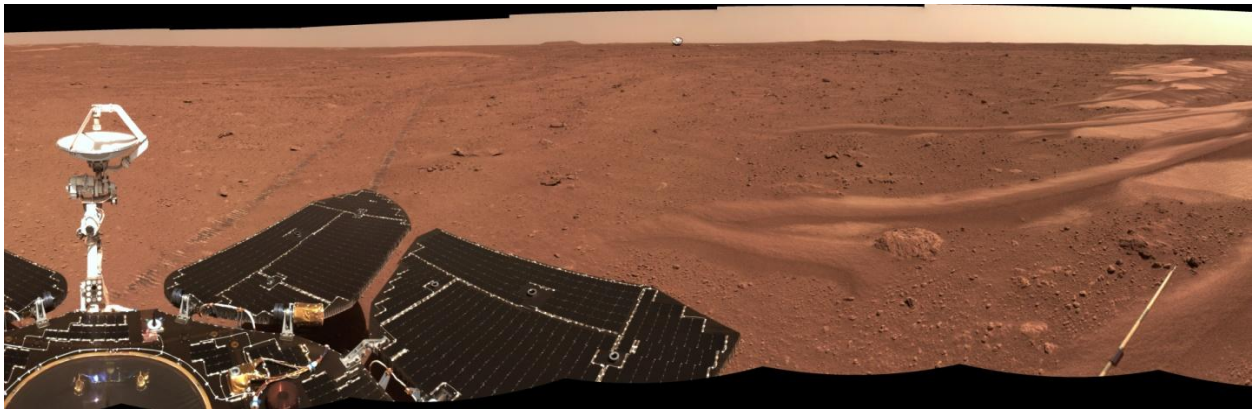


Planche 9 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 65 le 19 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

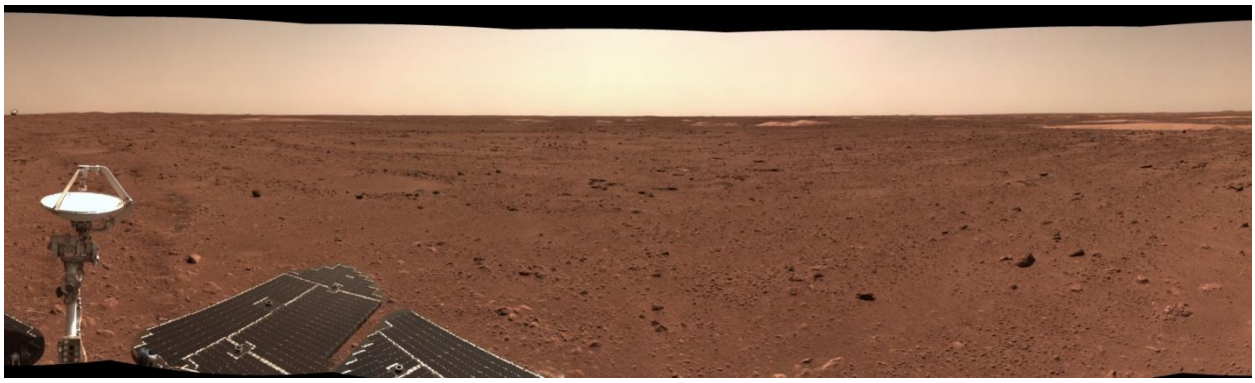


Planche 10 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 69 le 23 juillet 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

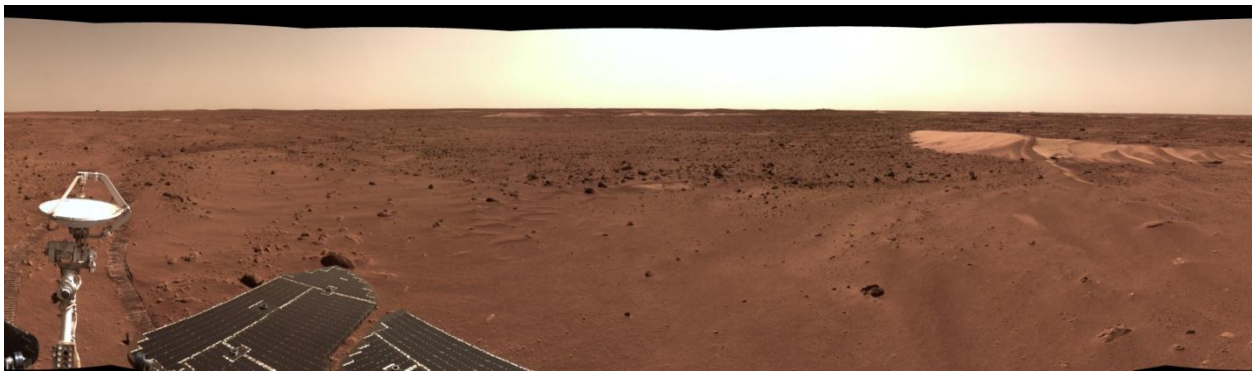


Planche 11 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 79 le 2 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

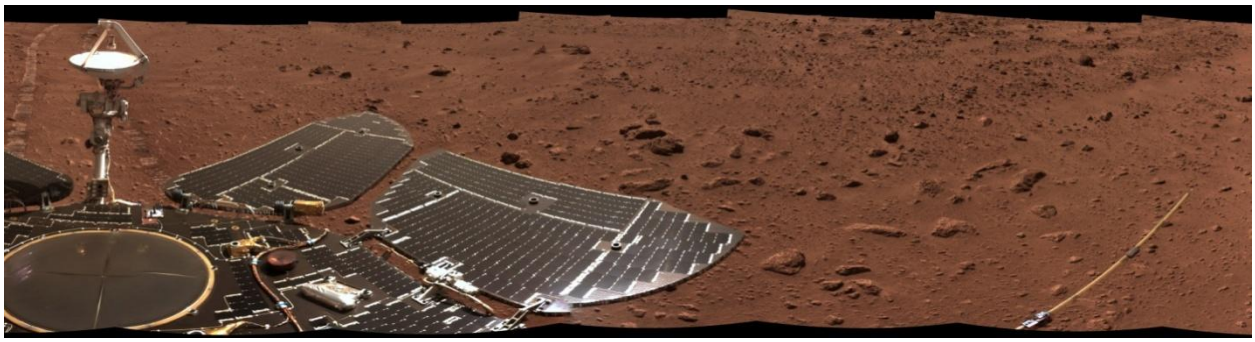


Planche 12 : Suite du panorama de 360° pris au Sol 84 le 8 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Incluant également la deuxième campagne d'analyse nocturne pour les spectromètres infrarouge de l'unité de détection MarSCoDe (LIBS et SWIR) au Sol 47, qui a été effectuée sur des cibles de sol se trouvant sur la dune. Le quatrième panorama couleur de 360° pris par les caméras de navigation et de terrain NaTeCam, est amorcé juste après le levé du jour près de l'extrémité sud-est de la crête de dune de teinte claire (TAR 1) au Sol 50 le 4 juillet 2021 (Planche 7). La septième campagne d'analyse effectuée par le spectromètre infrarouge à claquage induit par laser (LIBS) de l'unité de détection MasrSCoDe, est exécutée le même jour en fin de matinée avec au programme deux séances de tirs laser sur deux cibles de sol à 10h47 et 11h00. Après avoir fini de contourner la dune par le nord-est au Sol 52, l'astromobile reprend la route vers le sud en direction du parachute qui se trouve à environ 150 mètres plus loin.

Figure 15 : Parachute et coque arrière Sol 57 (Crédit : CNSA)

Le rover Zhurong qui roule toujours vers le sud sur un terrain très plat en explorant la plaine rouge et poussiéreuse d'Utopia Planitia, franchis le cap du 300^{iem} mètre parcourus à la surface de la planète le 7 juillet 2021 (Sol 53). Quatre Sols plus tard sur le Sol 57 le 11 juillet, l'astromobile arrive à proximité (environ 30 mètres) du parachute et de sa coque arrière (Bach Shell) (Figure 15). Durant les trois Sols suivant, le rover va étudier tranquillement les environs tout en poursuivant sa route vers le sud. Le lendemain au Sol 58 le 12 juillet 2021, est une grosse journée de travail et d'étude pour Zhurong. Le Sol commence par une séance de conduite ou le rebot va franchir la borne du 400^{iem} mètres parcourus à la surface de la planète Mars. C'est la première fois que Zhurong parcourt une distance supérieure au cent mètres en seulement cinq Sols de conduite. La journée se poursuit avec une nouvelle campagne d'analyse avec les deux spectromètres infrarouge de l'unité de détection MarSCoDe, et qui est exécuté sur des cibles de sol en milieu de matinée vers les 9 heures du matin. Puis au beau milieu de l'après-midi vers les 15h30, le rover entame le cinquième panorama couleur de 360° de la mission à l'aide des caméras de navigation et de terrain NaTeCam (Planche 8). Vers le centre de l'image situé au loin sur la ligne d'horizon entre le parachute et l'antenne parabolique à gain élevé de Zhurong, nous pouvons voir le sommet du volcan de boue en forme de cône « Yaodian Tholus », qui s'éloigne de plus en plus à l'horizon. Et vers le centre de la partie gauche de l'image de droite du panorama, toujours situé au loin sur la ligne d'horizon juste au-dessus de la pointe du panneau solaire du côté droit, nous pouvons voir très faiblement le module d'atterrissage. Il s'agit de la dernière apparition du module d'atterrissage sur des images prises par l'astromobile Zhurong durant le reste de sa mission sur Mars. La dune de teinte claire TAR 1 est également faiblement visible vers le centre de la partie gauche de l'image de droite du panorama, elle est situé juste sous le module d'atterrissage au bout des empruntes de roues du robot sur le sol martien.

Le cap du 500^{iem} mètres parcourus à la surface de la planète Mars est atteint le 17 juillet sur le Sol 63. Le robot arrive ensuite à la hauteur de l'extrémité ouest de la deuxième crête de dune de teinte blanche en forme de croissant composé de dépôts éoliens (TAR 2) au Sol 65 le 19 juillet 2021. Vers midi, l'astromobile exécute la sixième prise de vue panoramique qui dévoile alors toute la beauté du paysage martien imprégné dans un environnement sec et aride (Planche 9). Une partie de la dune TAR 2 est visible à chaque extrémité de l'image, et un agrandissement extrait d'une partie de celle-ci nous montre que la surface encroûtée de la dune est parcourus de

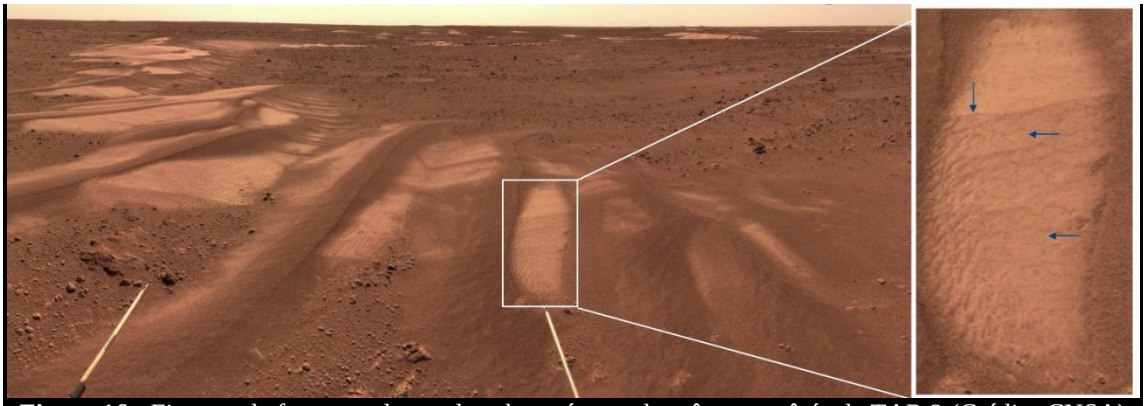
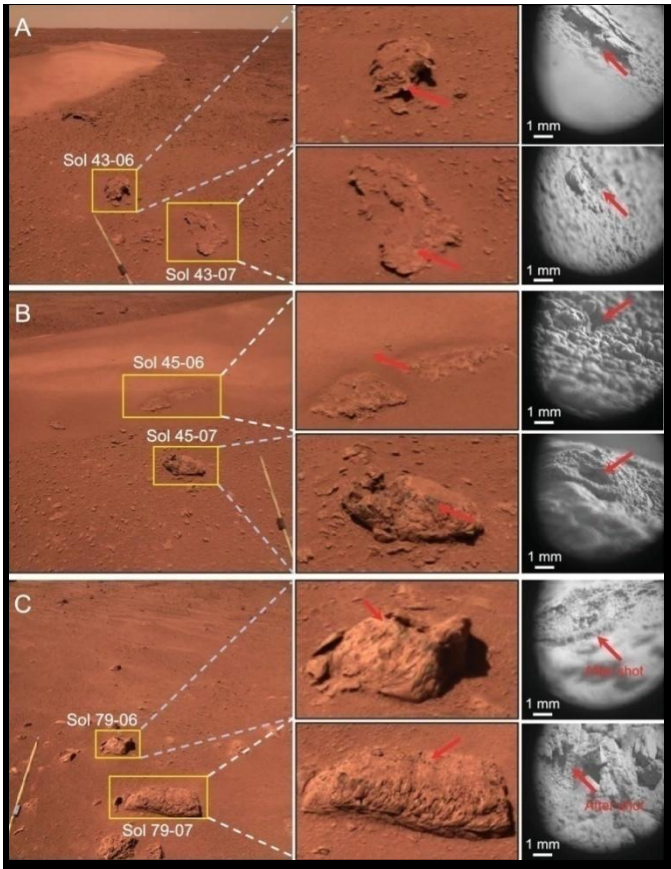


Figure 16 : Fissures de formes polygonales observées sur la crête encroûtée de TAR 2 (Crédit : CNSA)

petites fissures de formes polygonales mesurent entre 5 et 10 cm (Figure 16). Le bouclier arrière (Back Shell) très brillant et la dune TAR 1, sont bien visibles sur la ligne d'horizon en suivant les traces de roues du rover vers le centre de l'image de droite du panorama, ils sont situés de chaque côté du volcan de boue « Yaodian Tholus » qui s'éloigne toujours de plus en plus à l'horizon. Plus tard au court de la journée vers la fin de l'après-midi entre 16h30 et 17 heures, après avoir recharger ses batteries solaires. Le rover va effectuer la neuvième campagne d'analyse pour le spectromètre infrarouge à claquage induit par laser (LIBS) sur des cibles de sol se trouvant sur la dune TAR 2, entre coupé de la cinquième campagne pour le spectromètre infrarouge SWIR de l'unité de détection MarSCoDe. Les impulsions laser lors des analyses LIBS pourraient éliminer la poussière et exposer la surface des roches lors des premiers tirs, et des tirs ultérieurs révéleraient les compositions élémentaires sous la surface. Après avoir roulé sur une bonne soixantaine de mètres en trois séances de roulement quotidien depuis le Sol 67. Zhurong entame en fin d'après-midi vers les 15 heures, le septième panorama couleur de 360° des environs avec les caméras de navigation et de terrain NaTeCam au Sol 69 le 23 juillet 2021 (Planche 10). L'activité de l'astromobile se poursuit en début de soirée par la dixième campagne d'analyse du spectromètre infrarouge LIBS sur une cible de sol vers 19h20 pour la première séance, et sur une cible de roche vers 19h34 pour la seconde.

L'astromobile reprend la route vers le sud au Sol 71, et franchit la borne des 600 mètres parcourus sur le sol martien depuis le départ de la plateforme d'atterrissage. Après avoir passé entre une petite crête de dune en forme de croissant de teinte blanche et un petit cratère d'une dizaine de mètres de diamètre entre les Sols 73 et 78, c'est le tour du 700^{iem} mètre a être ajouté au compteur au Sol 78 le 2 août 2021. Le lendemain sur le Sol 79 durant la nuit vers les 2 heures du matin, le rover effectue la dixième série d'expérience avec le spectromètre infrarouge à claquage induit par laser (LIBS) sur une cible de roche, suivit de la sixième série d'expérience du spectromètre infrarouge SWIR de l'unité de détection MarSCoDe. En fin de soirée vers 21h40, le robot exécute une nouvelle prise de vue panoramique couleur des enivrons (Planche 11). Le cap des 800 mètres est franchit trois jours plus tard sur le Sol 82 le 6 août 2021. Après avoir effectué un court déplacement au Sol 83, l'astromobile capture le onzième panorama couleur de 360° à l'aide des caméras de navigation et de terrain NaTeCam au Sol 84 le 8 août 2021 (Planche 12). Le robot se déplace ensuite sur une courte distance au Sols 87, puis exécute la onzième campagne d'analyse du spectromètre infrarouge à claquage induit par laser (LIBS) de l'unité de détection MarSCoDe sur une cible de roche vers les 7 heures du matin.



Dans les sous-figures (A–C), les rectangles jaunes marquent les cibles sélectionnées dans les images NaTeCam, suivit du zoom pour mieux voir les points ciblés par le laser LIBS (marqués par des flèches rouges). La colonne de droite sont des images du micro-imageur TMI servant a documente le point d'impactes après les tirs laser.

(A) Deux fragments de roche analysés sur le Sol 43. L'échantillon « Sol 43-06 » était un revêtement de ciment en couches sur la surface rocheuse, et l'échantillon « Sol 43-07 » était la poussière recouvrant la surface rocheuse.

(B) L'échantillon « Sol 45-06 » était le sable de TAR 1, et l'échantillon « Sol 45-07 » a été mesuré sur les matériaux rocheux après ablation laser. Il s'agit de la seule mesure LIBS de roche ignée au cours des 110 premiers Sols.

(C) Deux fragments de roche mesurés sur le Sol 79. Le laser LIBS a frappé le revêtement cimenté sur la surface rocheuse et a brisé les ciments après ablation. Des micro-images (TMI) ont été prises uniquement après des mesures LIBS avant le Sol 58, et après des images TMI avant et après les mesures LIBS ont été disponibles.

Figure 17 : Certaines cibles rocheuses observées au cours de la traversée par l'unité de détection MarSCoDe (Crédit : Voir la note de bas de page numéro 4)

Le rover martien Zhurong a fonctionné durant sa mission jusqu'à maintenant sur le mode de conduite autonome avec détection efficace d'obstacle sur un cycle de sept jours, incluant un plan de détection quotidienne pour chaque Sol. Durant cette période, les caméras de navigations (HazCam et NaTeCam) ont fournis des données numériques sur le terrain en prenant des images sur chaque mètre parcourus en cours de route, que l'ordinateur de bord a convertie en modélisation 3D. L'astromobile prend lui-même en charge la planification du trajet ainsi que la sélection des cibles d'intérêts, selon la détection qu'il effectue et qui est basée sur la recherche de caractéristiques morphologiques et géologiques enregistré dans sa base de données. Le radar de détection souterrain (RoSPR), qui analyse et explore la surface en court de route, acquiert des données sur la structure en couches située sous la surface pouvant être utilisées par les eaux peu profondes, toujours à la recherche d'éventuelle trace de glace d'eau souterraine. L'instrument de mesure météorologique (MCS) prend des données météorologiques telles que la température, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, qui seront utilisées pour mener des recherches sur les caractéristiques physiques de l'atmosphère. Le champ magnétique de surface est sondé par le magnétomètre (RoMAG[10]) pour obtenir des données sur le champ magnétique local lorsque le rover est immobile, et coopère à l'occasion avec le magnétomètre de l'orbiteur Tianwen-1 pour explorer le processus d'évolution du champ magnétique martien. L'unité de détection de composition de surface (MarSCoDe) et les caméras multispectrales (MSCam) acquièrent des données spectrales de cibles en surface, telles que des roches et des sols

[10] Ground magnetic survey on Mars from the Zhurong rover 19 June 2023

spécifiques, dont les analyses sont utilisées par la suite pour faire des recherches sur la composition minéralogique élémentaire.

L’astromobile reprend la route au Sol 89, et arrive finalement à la hauteur de la troisième crête de dune de teinte claire en forme de croissant composé de dépôts éolien (TAR 3) le lendemain sur le Sol 90 le 14 août 2021, avec un total de 889 mètres au compteur. Il s’agit d’un jour très important qui marque un très grand exploit pour le programme spatial chinois. Le rover Zhurong vient de remplir l’objectif des 90 Sols définit comme période nominale initiale de la mission, un indicateur qui garantissait la réussite de la première mission chinoise sur Mars (un Sol, ou jour sur Mars, dure environ 24 heures et 40 minutes, soit une durée correspondant à environ 92 jours terrestres). À partir de ce Sol, le rover qui est toujours en très bon état, est maintenant en phase de mission d’exploration prolongée sur la planète rouge.

MISSION ÉTENDUE
(Sols 91 à 361)

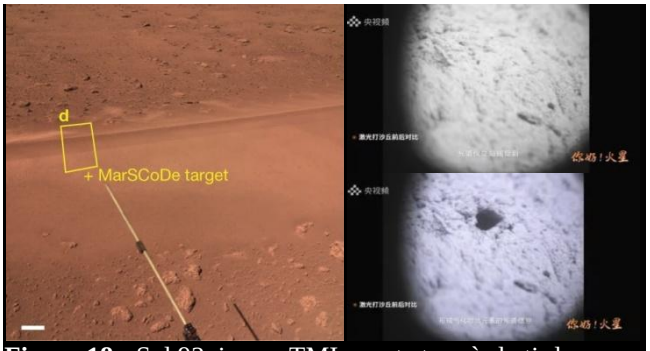


Figure 18 : Sol 92, image TMI avant et après le tir laser sur la deuxième cible de sol à 09:51:13 et 09:54:11 AM (Crédit : CNSA/XINHUA)

L'astromobile qui est maintenant dans sa mission étendue positionné à l'extrémité Est de la dune TAR 3. Entame les préparatifs au milieu de la matinée au Sol 92 le 16 août 2021 vers 9 heures, pour exécute la treizième campagne d'analyse avec le spectromètre infrarouge à claquage induit par laser (LIBS) sur deux cibles de sol se trouant sur la dune (Figure 18). L'expérience est accompagnée de la septième campagne d'analyse du spectromètre infrarouge à onde courte SWIR de l'unité de détection MarSCoDe, dont les séances de lecture spectroscopiques sont effectuées après chaque tir laser. Le dixième panorama couleur de 360° pris à l'aide des caméras de navigation et de terrain NaTeCam (Planche 14) est exécuté le même jour, et donne une très belle prise de vue sur la troisième crête de dune de teinte claire en forme de croissant (TAR 3). Le robot Zhurong reprend la route sur le Sol suivant, et après avoir roulé sur plus de 100 mètres en six séances de roulement quotidiens depuis le Sol 86. Le rover franchis le cap des 900 mètres parcourus à la surface de la planète rouge durant le trajet effectué au Sol 94 (18 août), et s'arrête à la hauteur de la crête ouest d'un cratère ensablé peut profond d'environ 70 mètres de diamètre.

L'astromobile amorcé ensuite le contournement par le nord-ouest de la quatrième crête de dune de teinte claire en forme de croissant (TAR 4) entre les Sols 95 et 98. Et après avoir sélection un nouveau site d'intérêt géologique et scientifique, Zurong s'arrête à son extrémité nord-est durant les trois Sols suivant (Sols 98 à 100), dans le but d'étudier les environs avec ses différents instruments scientifique. Durant cette pause de trois Sols, le rover prend le temps d'exécute une nouvelle prise de vue panoramique de 360° à l'aide de ses caméras de navigation NeTeCam au Sol 99 le 23 août 2021 (Planche 15), l'image donne directement sur la crête de dune de teinte claire TAR 4. La huitième campagne d'étude commence par une séance d'analyse du spectromètre infrarouge à ondes courtes SWIR de l'unité de détection MarSCoDe, qui est effectuée sur une cible de roche en milieu de l'après-midi vers les 14h30 au Sol 100 le 24 août 2021. L'analyse de la roche se poursuit par une séance de tir laser lors de la quatorzième campagne d'expérience mené par le spectromètre infrarouge LIBS, et se termine par la seconde lecture spectrographique effectuée par le spectromètre SWIR. Le robot a maintenant recueilli plus de 10 giga-octets de données primaires depuis son atterrissage à la mi-mai. Et au cours des 100 premier Sols d'opérations sur Mars, l'astromobile Zhurong a rencontré un total de huit TAR le

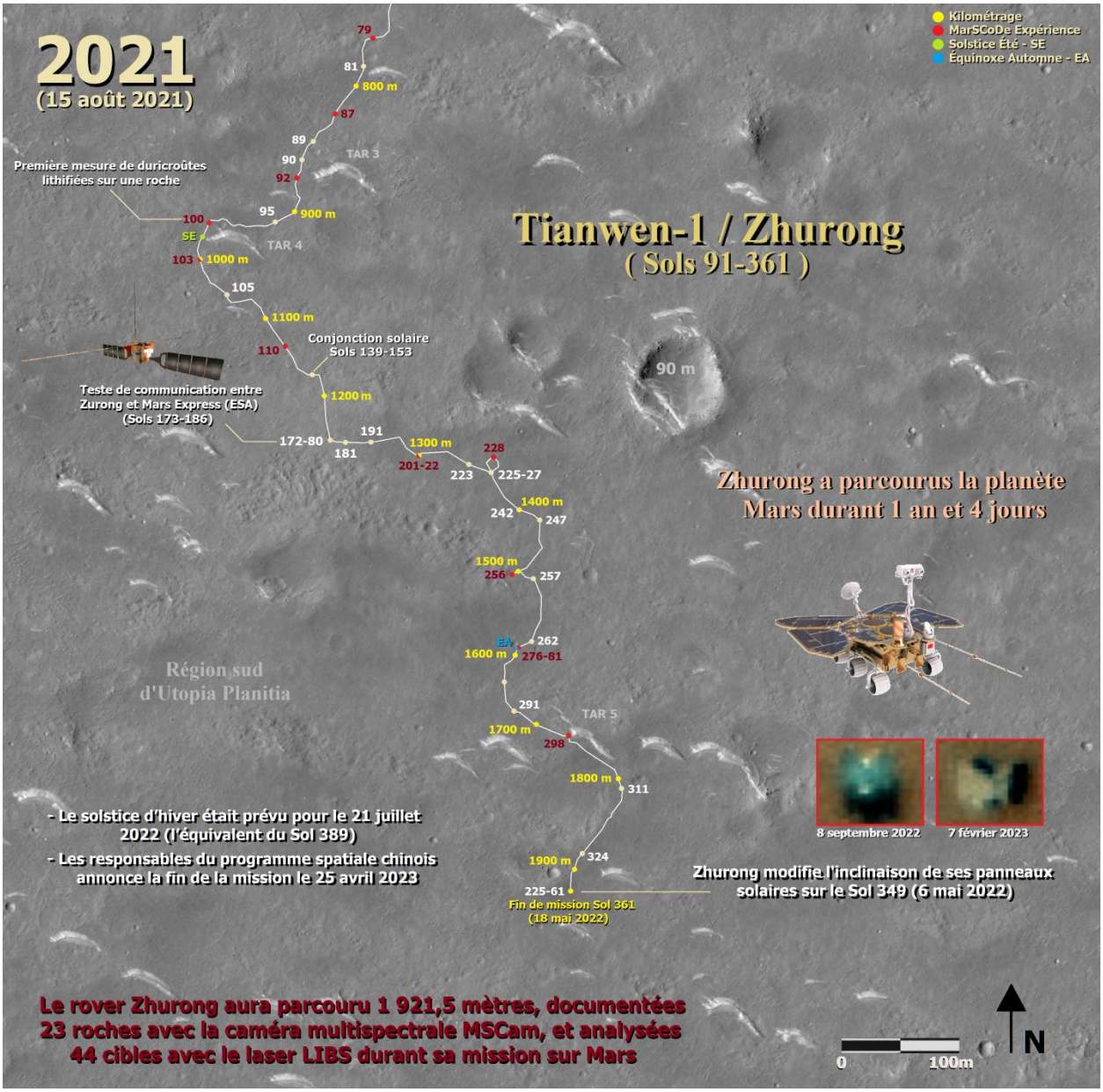


Planche 13 : Carte du trajet de l'astromobile chinois Zhurong entre les Sols 91 et 361. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 11 Juin 2021. Position et trajet des rovers guidés par les cartes de la Nasa et de Philip J. Stooke.

long de sa traversée. Les dunes ont une largeur moyenne comprise entre 25,1 et 63,8 mètres et des longueurs situés entre 5 et 10,9 mètres, avec une hauteur peuvent atteindre 1,9 mètre. Elles présentent tous des fissures de forme polygonales en surface de taille centimétrique à décimétrique, mesurant en moyenne entre 5 et 10 cm sont. Le lendemain sur le Sol 101 le 25 août 2021, arrive le solstice d'été dans l'hémisphère Nord de la planète.

Au départ de TAR 4 sur le Sol 102 le 26 août 2021, Zhurong franchit le cap de son premier kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars, et commence à se déplacer en direction sud-est dans le but de trouver un passage plus sécuritaire à travers un terrain qui devient de plus en plus accidenté par les rebords surélevés des cratères d'impacts qui se trouvent à

proximité. La quinzième campagne d'expérience effectuée par le spectromètre à claquage induit par laser LIBS, entre coupée après chaque tirs laser par la neuvième campagne d'expérience du spectromètre à onde courte SWIR de l'unité de détection MarSCoDe, Sont exécutées en fin de l'après-midi vers les 16h au Sol 103 le 27 août 2021, sur une cible de roche pour la première séance et sur une cible de sol pour la seconde. Le rover entame ensuite vers les 17h, le douzième panorama couleur de 360° à l'aide des caméras de navigation et de terrain NaTeCam (Planche 16). Zhurong reprend ensuite la route vers le sud-est, et après avoir franchit une soixantaine de mètres en cinq séances de roulement quotidien, l'astromobile franchit le cap des 1 100 mètres parcourus à la surface martienne le 1er septembre 2021 au Sol 108. Après avoir effectué un nouveau déplacement exécuté en deux séances de roulement quotidien (Sol 109 et 110). Le robot se positionne en milieu de soirée entre 20 et 21 heures au Sol 110 le 3 septembre 2021, pour entamer la seizième campagne d'étude du spectromètre infrarouge LIBS sur deux cibles de sol, accompagnée de la dixième campagne de mesure spectroscopique du spectromètre SWIR de l'unité de détection MarSCoDe. Ensuite vers 21h30, le rover amorce le treizième panorama couleur de 360° de la mission (Planches 17) avec ses caméras de navigation et de terrain NaTeCam.

L'astromobile Zhurong reprend la route au Sol 112 en parcourant une vingtaine de mètres, et s'arrête de nouveau dès le lendemain après avoir effectué une courte séance de conduite sur le Sol 113 le 6 septembre 2021 avec un total de 1 171 mètres au compteur. Il s'agit d'une longue pause obligatoire pour le robot, le temps de se préparer a passé à travers la conjonction solaire d'une durée de deux semaines qui se produira entre le 30 septembre et le 18 octobre 2021 (Sols 137 à 155). Les deux vaisseaux spatiaux chinois (Orbiteur Tianwen-1 + astromobile Zhurong) passeront en mode sans échec durant plus de 35 jours, soit de la mi-septembre à la fin octobre entre les Sols 120 et 155 (du 13 septembre au 18 octobre), en raison des communications qui seront interrompus entre la Terre et la planète Mars durant cette période. Avec Mars passant de l'autre côté du Soleil par rapport à la Terre, la ligne de visée avec la planète rouge sera obscurcie par le Soleil. Les particules chargées de haute énergie émises par le Soleil vont interférer avec les communications entre les planètes, pouvant corrompt les instructions envoyés dans les deux sens et mettre en danger la poursuite de la mission martienne. Le rover Zhurong devra donc fonctionner de manière entièrement automatisé avec des capacités réduites, suivant une planification d'activité préprogrammée et téléchargé à l'avance dans la mémoire de l'ordinateur de bord de l'astromobile. Durant cette longue période de solitude et de tranquillité, le robot va en profiter pour prendre la quinzième vue panoramique couleur de 360° de la mission avec ses caméras de navigation et de terrain NaTeCam au Sol 162 le 25 octobre 2021 (Planches 18).

Une fois la pose pour le transit solaire terminé au Sol 163 le 26 octobre 2021. L'astromobile envoie un signal vers la Terre, qui se trouve alors à une distance de plus de 400 millions de km, pour indiquer qu'il se trouve dans un état normal et toujours près a poursuivre sa randonnée sur un terrain qui se trouverait jadis sous le rivage d'un ancien océan dans la région sud d'Utopia Planitia. Le prochain objectif d'intérêt géologique et scientifique sont des volcans de boue qui se trouve plus au sud à environ 10 kilomètres. L'astromobile reprend la route vers l'est au Sol 164, puis change de direction pour se diriger plein sud au Sol 166 le 28 octobre 2021, ou le robot franchit le cap des 1 200 mètres, et parcourt une distance de plus de 70 mètres effectuée en quatre séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 172 le 3 novembre 2021. Tandis que l'orbiteur Tianwen-1 se prépare à changer de trajectoire pour se place sur une orbite polaire elliptique finale de télédétection à partir du Sol 175 le 9 novembre 2021, ayant comme objectif

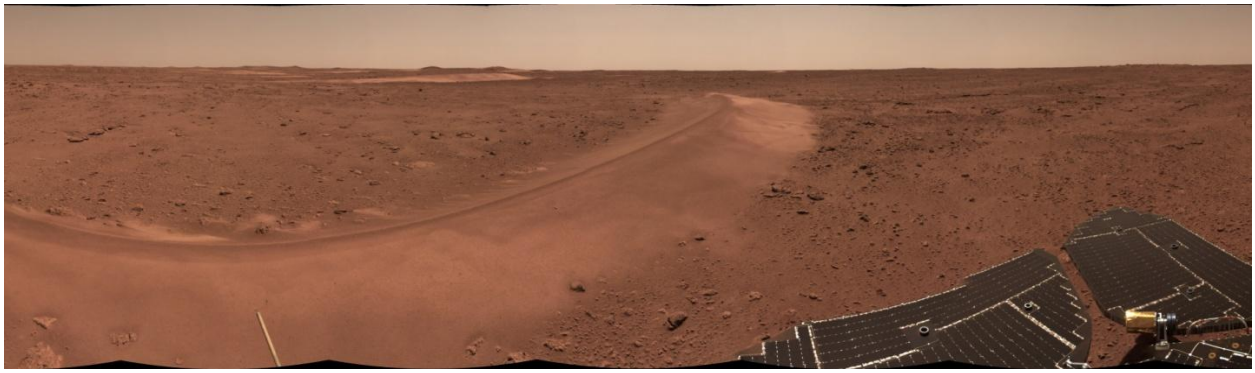


Planche 14 : Panorama au Sol 92 à la hauteur de TAR 3 le 16 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

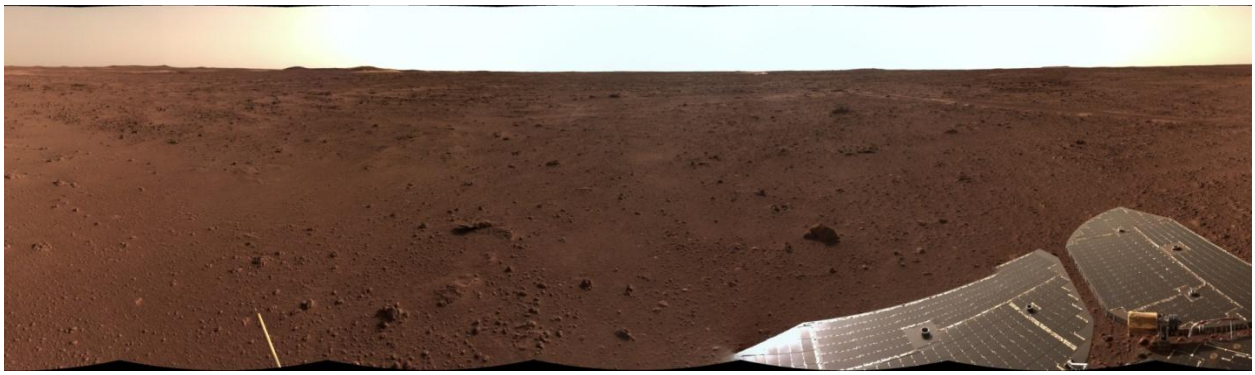


Planche 15 : Panorama au Sol 99 à la hauteur de TAR 4 le 23 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

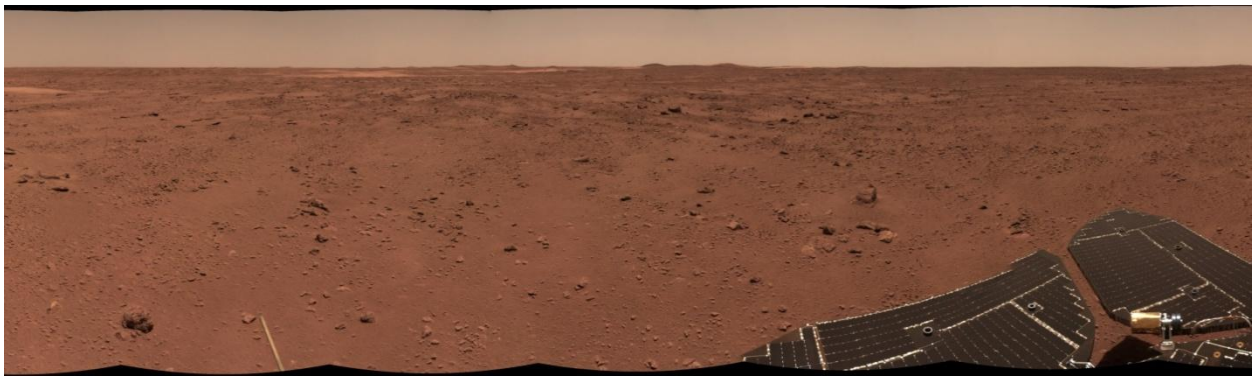


Planche 16 : Panorama au Sol 103 le 27 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

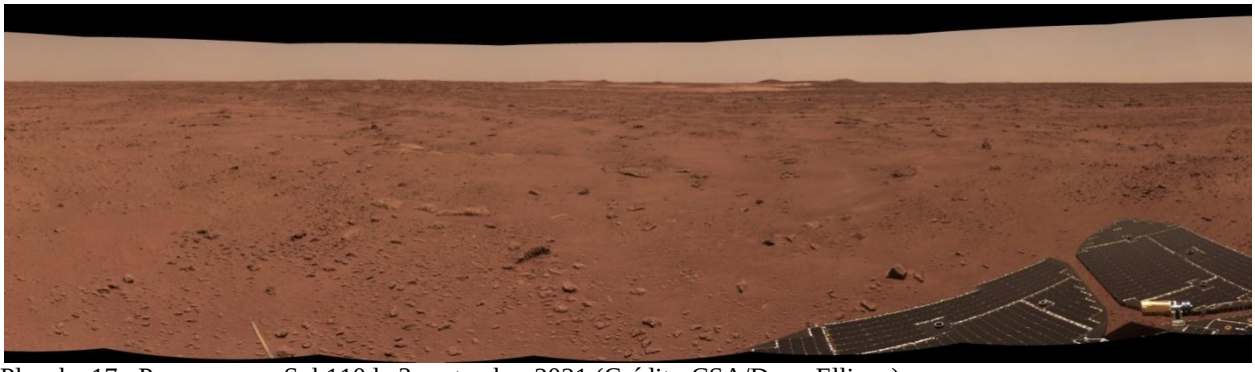


Planche 17 : Panorama au Sol 110 le 3 septembre 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

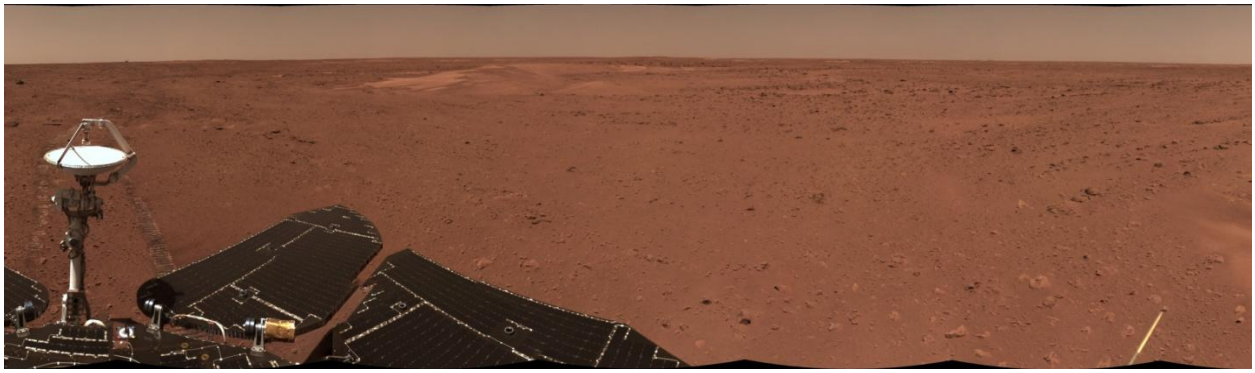


Planche 14 : Suite du panorama au Sol 92 le 16 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Planche 15 : Suite du panorama au Sol 99 le 23 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

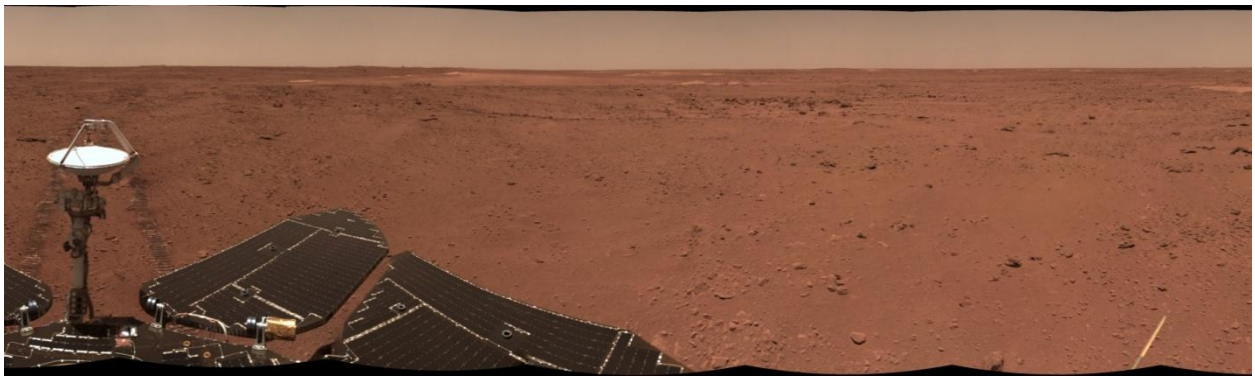


Planche 16 : Suite du panorama au Sol 103 le 27 août 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

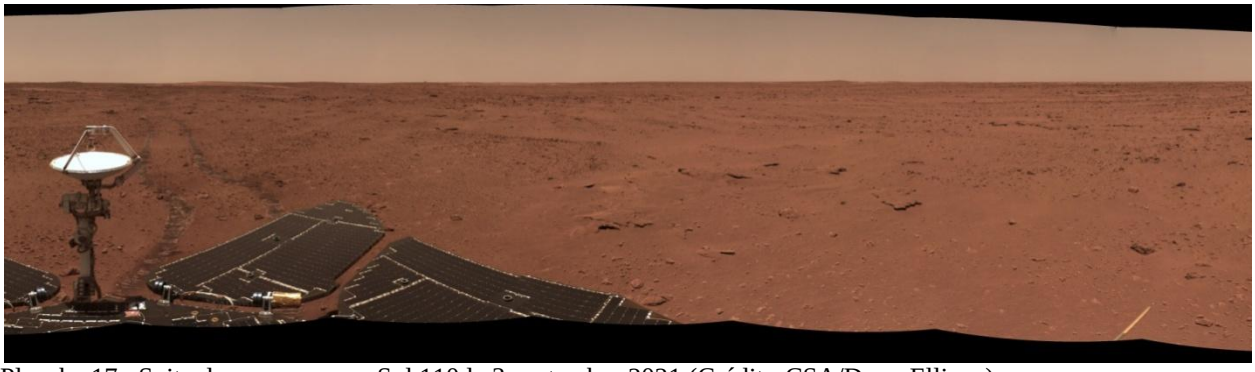


Planche 17 : Suite du panorama au Sol 110 le 3 septembre 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

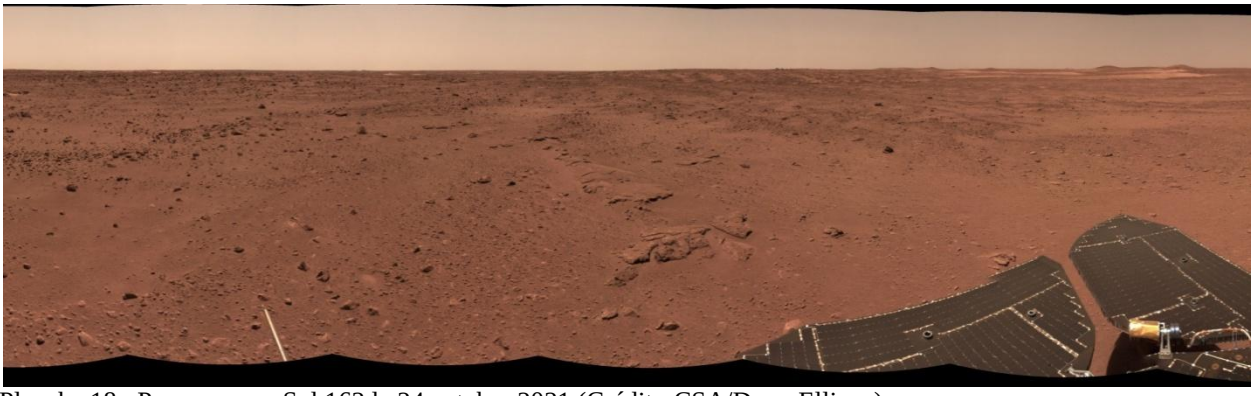


Planche 18 : Panorama au Sol 162 le 24 octobre 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

d'entamer une étude scientifiques plus globale de la planète Mars avec ses propres instruments, tout en étant toujours capable de relayer les données de Zhurong vers la Terre.

Étant donné que la technologie chinoise de télécommunication n'est pas compatible avec les appareils Européens et Américain en orbites, les communications bidirectionnelles entre ses appareils ne sont pas possible. Ce statu quo a incité les Européens et les Chinois à concevoir une série d'expériences, afin de déterminer si des messages pouvaient être envoyés à sens unique dans ces circonstances loin d'être idéales (sans comprendre le contenu du signale ennoyé car étant basé sous un protocole de transmission inconnu par le relais en orbite). Alors qu'un nombre croissant de pays planifient désormais des missions vers l'espace lointain, et que tous ne possède pas encore des équipements ayant les mêmes normes de communication, la possibilité d'interagir avec du matériel étranger pourrait devenir cruciale pour le succès des futurs projets d'exploration. Le dimanche 7 novembre 2021 (Sol 173), le rover Zhurong se prépare à tester sur plusieurs Sols une méthode de communication de secours avec l'équipe de l'orbiteur Mars Express de l'agence spatial européenne (ESA), qui est en orbite autour de la planète Mars depuis décembre 2003.

Le matériel des différentes missions laissées à la surface de la planète est équipé de systèmes et de protocoles différents pour communiquer avec la planète d'origine. Dans la plupart des cas la communication avec la Terre ne se fait pas de manière directe, mais avec l'aide d'un orbiteur qui gravite autour de la planète et qui peut servir de relais de communication plus stable avec la Terre. Depuis son atterrissage en mai 2021, l'astromobile Zhurong a transmis ses données uniquement à l'aide de l'orbiteur Tianwen-1. Cependant, il est souvent utile d'explorer d'autres moyens de transmettre des données vers la Terre. Une solution courante consiste à utiliser les orbiteurs martiens des autres agences spatiales pour fournir un support de communication en cas de difficulté rencontré sur le terrain. Bien que cette technique en mode de transmission « aveugle » soit disponible depuis plus de 10 ans, elle n'a pas encore été utilisée en orbite autour d'une autre planète. Le système de communication MELACOM porté par Mars Express dispose d'une fonction de réception en « aveugle » dès le début de sa conception, initialement préparé pour l'atterrisseur "Beagle 2". Le vaisseau spatial Mars Express peut donc « entendre » le rover, mais le rover ne peut pas « entendre » Mars Express, car la fréquence d'émission de Zhurong correspond à la fréquence de réception de Mars Express. Cela signifie qu'un astromobile (rover) ou un atterrisseur (lander) lance ses messages dans le vide à l'aveugle de manière à croiser la course orbitale d'un orbiteur qui passe au-dessus d'eux à ce moment là, avant d'être récupéré et envoyés à quiconque qui écoute sur Terre puis retransmis par la suite à la Chine.

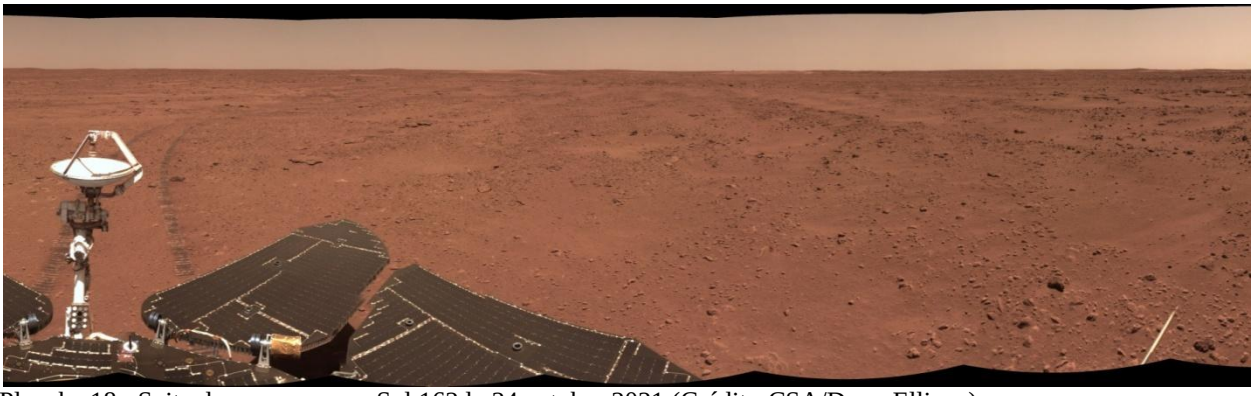


Planche 18 : Suite du panorama au Sol 162 le 24 octobre 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

Pour se préparer à ces tests, l'équipe de Mars Express a d'abord identifié cinq fenêtres de test de communication entre Mars Express et Zhurong échelonné sur plusieurs jours, chacune ayant une durée d'observation d'environ 10 minutes. La synchronisation des fenêtres de test avec la fréquence des différents passages du vaisseau spatial de l'ESA au-dessus du site d'atterrissage de Zhurong est très importante et cruciale. L'équipe de Zhurong a dut ensuite choisir cinq des meilleures fenêtres de passages pour relayer les communications en synchronisation avec leur propre activités d'opérations de mission en surface. Lorsque Mars Express survolera le site d'atterrissage de Zhurong dans Utopia Planitia, il allumera sa radio et écoutera sur plusieurs fréquences. Si l'orbiteur détecte le signal, la radio se verrouillera dessus et commencera à enregistrer toutes les données. À la fin de la fenêtre de communication, le vaisseau spatial se tournera pour faire face à la Terre et relayera ces données à travers l'espace de la même manière qu'il le fait pour les autres missions sur Mars. La vitesse à laquelle les données du rover seront transférées au vaisseau spatial, commencera à un rythme relativement lent de 8 kilo-octets par seconde lors du premier test, avant d'être progressivement augmentée à 128 kilo-octets par seconde par rapport aux tests restants. Cela permettra à l'équipe de l'ESA d'évaluer les performances de la technique de relais de données en mode de transmission « aveugle ».

Le premier test est réalisé au début de l'après-midi le dimanche 7 novembre (Sol 173) entre 12h07 et 12h17 UTC. Puis, le robot qui était alors à l'arrêt depuis les neuf derniers Sols (Sols 172 à 181), exécute un court déplacement d'une quinzaine de mètres en changeant brusquement de trajectoire pour se diriger vers l'est au Sol 181 le 15 novembre 2021, afin de suivre une route qui semble plus sécuritaire et moins accidentée, avant de s'arrêter de nouveau pour une période de neuf jours entre les Sols 181 et 190. Durant cette nouvelle pause, c'est le tour du deuxième test de communication à être effectué en début de soirée le mardi 16 novembre 2021 (Sol 182) entre 19h34 et 19h44 UTC. Suivit deux jours plus tard par le troisième test le jeudi 18 novembre (Sol 184) de 20h27 à 20h37 UTC, et du quatrième test le samedi 20 novembre (Sol 184) entre 21h20 et 21h27 UTC. Le dernier test de communication en aveugle est effectué en fin de soirée le lundi 23 novembre (Sol 186) entre 22h13 et 22h22 UTC. Mars Express a reçu avec succès les signaux des différents tests envoyés par le rover, et l'équipe de Zhurong a confirmé que toutes les données ont bien été reçues par leur équipe. L'astromobile reprend la route vers l'est en parcourant une courte distance au Sol 191, et s'arrête de nouveau pour faire une nouvelle pause d'une dizaine de jours entre les Sols 191 et 201. L'astromobile reprend de nouveau la route vers l'est au Sol 201 le 8 décembre 2021, et franchit le cap des 1 300 mètres parcourus à la surface de la planète Mars. Le robot fait alors une longue pause d'une durée de trois semaines

(Sols 201-222), durant lequel il exécute la dix-septième campagne d'analyse avec le laser du spectromètre LIBS sur une cible de roche au Sol 205 le 12 décembre 2021.

Bien que les données n'aient pas été enregistrées en continu pendant toute la durée de la mission. Les données climatiques de Zhurong observées par la station météorologique (MCS) constituaient les premières mesures in situ dans la région sud d'Utopia Planitia. La température la plus basse dans un Sol apparaît aux petites heures du matin vers 5h00, et la température la plus élevée apparaît en fin d'après-midi vers 15h00. La vitesse du vent apparaît comme maximale au début de l'été près du site d'atterrissage de Zhurong, et la valeur minimale de la pression a été de 677,70 Pa mesuré vers la fin de l'été au Sol 213 le 20 décembre 2021. La pression atmosphérique enregistrée au cours des différentes saisons par Zhurong, est similaire à celle observée par le rover Perseverance situé plus à l'ouest dans le cratère Jezero, mais environ de 40 Pa inférieure de celle mesurée par l'atterrisseur InSight situé plus au sud-est dans Elysium Planitia. InSight est situé plus près de la jonction des hautes terres du nord qui se trouve à environ 300 km plus au sud sur une altitude plus élevé. Cela est probablement causé par le fait que Zhurong et Perseverance ont des latitudes similaires avec une élévation plus basse, tandis que l'atterrisseur InSight a atterrit à un endroit plus proche de l'équateur. Il existe une corrélation directe entre la température et la latitude en fonction des saisons et de la plage de pression[11].

Figure 19 A : Tempête de poussière près d'Olympus Mons. Photo de la caméra MoRIC de Tianwen-1 du 6 janvier 2022.

Figure 19 B : Selfie de l'orbiteur Sol 225 (Crédit : CNSA/XINHUA)

L'orbiteur Tianwen-1 qui survole la région du pôle Nord de Mars, largue une nouvelle fois une petite caméra jetable pour prendre un nouveau selfie de l'orbiteur (Figure 19 B) au Sol 225 le 1er janvier 2022 (heure de Chine, soit le 31 décembre 2021 heure de l'est). L'image de très bonne qualité montre en arrière plan la calotte glaciaire arctique, le corps doré de l'orbiteur en plus de la couleur argenté de l'antenne directionnelle (situé sous le corps de l'orbiteur) utilisé pour la communication de données à haut débit avec le sol. Et pour finir les panneaux solaires déployés qui semble êtres en très bonne condition. La zone blanche sur Mars est la couche de « glace » recouvrant le pôle Nord. Contrairement à la glace des pôles terrestres, la « glace » sur Mars est composée de neige carbonique (dioxyde de carbone solide) et de glace d'eau. La zone sombre sur Mars situé au nord de la plaine d'Utopia Planitia, est un vaste champ de dunes ondulantes dénommé « Olympia Undae ». Le cratère brillant dans le coin supérieur gauche, situé juste sous la calotte polaire Nord est nommé « Korolev ». Au 31 décembre 2021 (Sol 224), l'orbiteur Tianwen-1 était en orbite autour de la planète Mars depuis 526 jours à plus de 350 millions de kilomètres de la Terre, et le délai de communication était d'environ 19,5 minutes.

[11] Initial results of the meteorological data from the first 325 sols of the Tianwen-1 mission, 27 février 2023

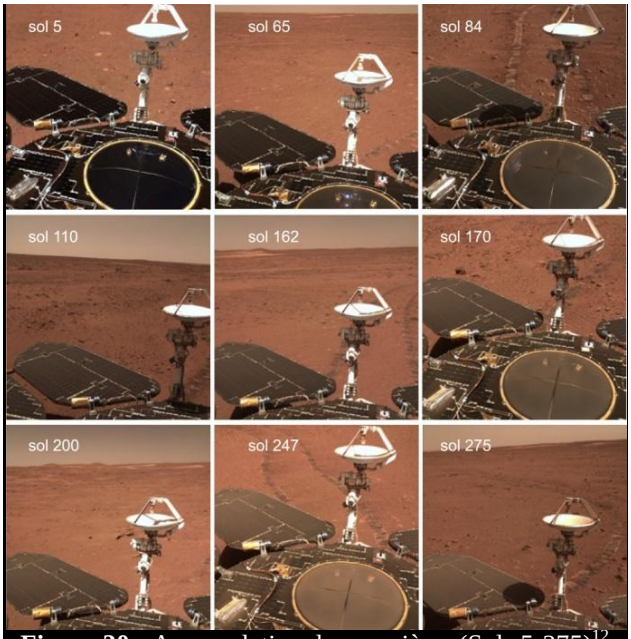


Figure 20 : Accumulation de poussières (Sols 5-275)[12]

L'astromobile effectue un petit déplacement en forme de boucle entre les Sols 227 et 228, et exécute ensuite la dix-huitième campagne d'étude de terrain avec le spectromètre LIBS au Sol 228 le 4 janvier 2022, incluant deux séances de tirs laser exécutées sur des cibles de sol. Le rover martien reprend ensuite la route vers le sud. Et après avoir exécuté deux séances de déplacement quotidien, Zhurong franchit le cap des 1 400 mètres parcourus à la surface de la planète rouge au Sol 242 le 16 janvier 2022. Cinq jours plus tard sur le Sol 247, le robot reprend la route vers le sud en effectuant trois nouvelles séances de conduite quotidienne, ajoutant plus d'une centaine de mètres au compteur. Ce qui lui permet de franchir le cap des 1500 mètres parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 256. Au Sol 255 le 29 janvier 2022, Tianwen-1 était en orbite depuis 557 jours à environ 325 millions de kilomètres de la Terre. Sur le 256 le 30 janvier 2022, Zhurong entame la dix-neuvième campagne d'expérience effectuée par le spectromètre LIBS comprenant deux séances de tir laser sur deux cibles de roche, puis reprendre la route vers le sud dès le lendemain. Toujours en déplacement vers le sud, le robot a parcourus 124 mètres supplémentaire en neuf séances de roulement quotidien entre les Sols 247 et 276, soit du 21 janvier au 21 février 2022, avec un cumulatif de 1 524 mètres au compteur. La figure 20 compare l'accumulation de la poussière sur les panneaux solaires du rover depuis les huit dernier mois entre les Sols 5 et 275 (19 mai 2021 au 20 février 2022). Après une longue pose de deux semaines entre les Sols 262 et 276, l'astromobile reprend la route vers le sud-ouest en se faufilant entre deux petits cratères, dans l'espoir de rejoindre un alignement de champs de dune de teinte clairs qui se trouve à environs 200 mètres plus loin vers le sud. Le robot s'arrête de nouveau entre les Sols 276 et 281 (du 21 au 26 février 2022) devant deux petits cratères de quelques mètres de diamètre, ou il entame la vingtième campagne d'expérience effectuée par le spectromètre LIBS comprenant une séance de tir laser sur une cible de roche au Sol 276, entre coupée par la onzième campagne de mesure spectrographique exécutée par le spectromètre infrarouge à onde courte SWIR.

L'automne et l'hiver sont les saisons où le sable et la poussière sont fréquents dans l'hémisphère nord de Mars. La surveillance des images montre qu'à partir de la fin du mois de janvier 2022, d'importantes activités de vent et de sable ont commencé à se produire dans la zone située au 60° de latitude nord sur Mars. L'astromobile Zhurong dispose de moyens actifs pour éliminer la poussière de ses quatre panneaux solaires, mais serait incapable d'effectuer cette opération en hibernation par manque d'énergie. La période des tempêtes de poussières commence au beau milieu de l'automne dans l'hémisphère Nord de la planète, dont l'équinoxe a eu lieu le 25 février 2022 au Sol 280. Il s'agit de la période de l'année martienne qui est marqué par l'arriver de la saison des tempêtes régionale ou le taux de poussière dans l'atmosphère martienne est élevé, et des tourbillons de poussière (Dust Devil). Et elle se termine vers la fin de la saison

[12] In-Flight Calibration of Near-Infrared Reflectance Spectra Measured by the Zhurong Mars Rover: 30 January 2023

hivernale après avoir transité par le solstice d'hivers prévue plus tard au cours de la mission le 21 juillet 2022, avec des températures qui deviendront de plus en plus froide à l'approche tend redoutée du prochain hiver martien.

Zhurong se déplace ensuite vers le sud en direction de l'extrémité nord-ouest de la cinquième crête de dune de teinte claire en forme de croissant (TAR 5), et durant le trajet l'astromobile franchit le cap des 1 600 mètres parcourus à la surface de Mars au Sol 282 le 1er mars 2022. Après avoir effectué plusieurs séances de conduites quotidiennes sur le sol martien, ou la borne des 1700 mètres est franchis durant le trajet, le rover arrive finalement a proximité de TAR 5 au Sol 297 le 15 mars 2022. La dernière campagne (21iem) d'analyse effectuée par le spectromètre à claquage induit par laser (LIBS) de l'unité de détection MarSCoDe, est exécutée dès le lendemain sur une cible de sol se trouvant sur la dune. Après une semaine d'arrêt, le robot se déplace de quelques mètres pour se positionner plus près de la dune au Sol 304. Le rover Zhurong repart ensuite vers l'est et effectue trois séances de conduite quotidienne entre les Sols 307 et 311 totalisant un parcours d'environ 70 mètres, et durant lequel la borne des 1 800 mètres est franchit au Sol 311 (29 mars 2022). Le robot change sa trajectoire de conduite en tournant vers le sud-ouest, et exécute les cinq dernières séances de roulement quotidien qui sera effectuée sur le sol martien durant la mission, et lors du dernier déplacement Zhurong franchit le cap des 1 900 mètres parcourus à la surface martienne au Sol 325 le 12 avril 2022.

Au cours des trois prochains mois, le Soleil va se déplacer de plus en plus bas sur l'horizon, lorsque l'hémisphère nord de Mars entrera dans la saison la plus froide de l'année à l'approche du solstice d'hiver prévu pour le 21 juillet 2022 (soit l'équivalent du Sol 389 pour la mission) avec des température comprise entre -20 °C le jour jusqu'à -100 °C la nuit. Déjà affecté par une dure saison de tempêtes de sable, les panneaux solaires de Zhurong sont probablement déjà entièrement recouverts d'une fine couche de poussière rougeâtre, comme semble le suggérer les images de la figure 20. Les panneaux solaires auront de plus en plus de difficulté à capter efficacement l'énergie solaire et d'emmagasiner l'électricité pour recharger les batteries. Afin de survivre en toute sécurité aux conditions météorologiques extrêmes, telles que les hivers très froids et les tempêtes de sable. Le rover Zhurong possède différents modes de fonctionnement tels que le sommeil autonome planifié. Une fois l'énergie réduite à un certain niveau, l'astromobile est programmé pour entrer automatiquement en mode de veille prolongé (ou état d'hibernation), et d'attendre jusqu'à ce que les conditions environnementales s'améliorent progressivement avant de revenir à la normale. Au mois de décembre 2022, soit huit mois plus tard par rapport au dernier déplacement connue du rover sur le sol martien effectué au Sol 325 le 12 avril 2022. Le site d'atterrissage de Zhurong va entrer au début de la saison printanière à l'approche de l'équinoxe de printemps prévu pour le 27 décembre 2022. Avec le retour des températures plus clémentes et une lumière qui aura atteint un niveau permettant aux panneaux solaires de produire suffisamment d'électricité. Le rover Zhurong pourra alors sortir de sa longue période de sommeil prolongé. L'astromobile est programmé pour se réveiller de manière autonome lorsque deux conditions essentielles seront remplies. Il s'agit d'une température plus clémente supérieure à -15 °C, et la capable de générer suffisamment d'énergie solaire avec une production supérieure à 140 watts.

Par manque d'ensoleillement et d'énergie, et afin de résister au ciel empoussiéré par une tempête de poussière régionale qui passe juste au-dessus de la zone d'exploration. Dont l'évolution a été observée depuis l'espace par l'orbiteur Tianwen-1 entre mars et avril 2022

(Figure A). Le robot Zhurong qui a déjà réduit ses déplacements et ses activités scientifiques par manque d'énergie, modifie l'inclinaison de ses panneaux solaires au Sol 349 le 6 mai 2022, dans le but d'optimiser le rendement de ceux-ci et d'améliorer le chargement de ses batteries. La situation dans la zone d'exploration ne s'améliorant pas, et continuant toujours à sa dégrader de plus en plus. Douze jours plus tard sur le Sol 361 le 18 mai 2022, l'astromobile exécute la commande pour passer en mode de sommeil planifier de longue durée (hibernation), dans l'espoir de passer à travers les températures très froides de l'hiver martien. Et dans l'attente de jour meilleur à l'approche de l'équinoxe de printemps prévue dans sept mois pour le 27 décembre 2022 (soit l'équivalent du Sol 584 dans une éventuelle sortie d'hibernation). Mais seulement deux jours plus tard tout contacte radio avec le rover ont été perdus, plus aucune nouvelle du rover ne sera transmit vers la terre durant le passage de l'hiver martien. Il est soudain devenu impossible de vérifier l'état du fonctionnement vital de l'astromobile sur la planète Mars.

Figure 21 : Phobos (Crédit : CNSA)

Durant ce temps, et pour marquer le deuxième anniversaire du lancement de la mission Tianwen-1 vers Mars (23 juillet 2020). L'équipe d'exploitation de Tianwen-1 a saisi le moment où l'orbiteur était relativement proche de lune Phobos à plus de 5 100 kilomètres de distance, pour capturé des images claires du satellite avec la caméra de haute définition HiRIC de Tianwen-1 le 23 juillet 2022 (Figure 21). Mars possède deux petits satellites naturels, Phobos et Deimos (qui signifie peur et terreur). La plus grande des deux lunes est Phobos avec un diamètre de 11 kilomètre, et elle est la plus éloigné situé sur une orbite à 6 000 kilomètre de la surface martienne qu'elle complète en seulement 7 heures et 39 minutes. Elle fait donc un peut plus que trois fois le tour de la planète Mars par Sol. Mais décembre passe et toujours pas de nouvelle de Zhurong. Le robot ne s'est pas réveillé comme prévu après huit mois d'hibernation en date du 18 janvier 2023. Il restait cependant un dernier espoir, car la saison des tempêtes et des tourbillons de poussières (Dust Devil) n'était pas encore terminé, et elle ne prendra fin qu'à l'approche du printemps en décembre 2022. Un tourbillon de poussière pouvait toujours passer par-là juste au-dessus de Zhurong et de nettoyer les panneaux solaires. Cet espoir de réactivation de l'astromobile est fondé sur l'expérience de rover Spirit dans le cratère Gusev en 2005, qui a rencontré par hasard un tourbillon de poussière qui a nettoyé ses panneaux solaires tout en participant à l'amélioration de la production d'électricité. Il s'agit d'un événement très bénéfique survenu au Sol 421 de la mission de Spirit, lors de l'ascension de Husband Hill, et qui a redonnée vie à la mission du robot.

Cependant, une série d'images prises par la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) de l'orbiteur américain Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) situé à plus de 290 km d'altitude, et publiées le 21 février 2023. A réussis a capturée en image la position du rover sur Mars à différents moments de sa mission (Figure 21). Les images montrent clairement que le robot n'a pas changé de position depuis au moins le mois de septembre 2022, et qu'il est resté immobile tout ce temps par rapport au dernier mouvement connue du rover sur Mars. Cette analyse provient de deux images acquises entre le 8 septembre 2022 (l'équivalent du Sol 474) et le 7 février 2023 (l'équivalent du Sol 626), soit six semaine après la fin supposée de la période d'hibernation si le rover avait survécue à la poussière et au rude hiver martien. L'astromobile Zhurong est visible dans la partie supérieure de la première image (à gauche), qui correspond

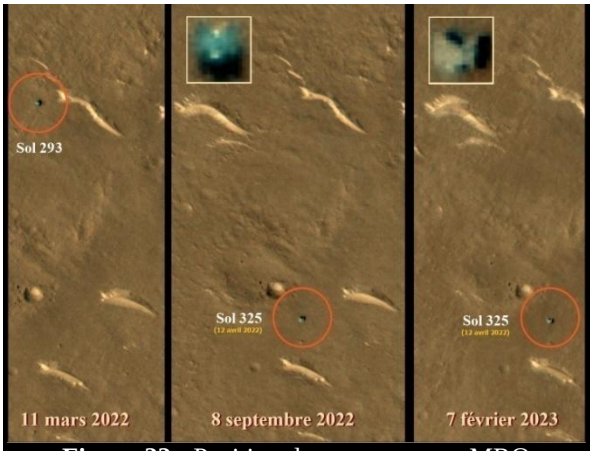


Figure 22 : Position du rover vue par MRO (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona)

alors au Sol 293 le 11 mars 2022 de la mission, et dans la partie inférieure des deux autres images correspondant à la dernière position connue du robot lors de son dernier déplacement effectué sur la planète Mars au Sol 325 le 12 avril 2022. Les petits encadrés situé dans le haut de l'image du centre et de droite de la figure 21, dévoile une très grande accumulation de poussières sur les panneaux solaires du rover durant cet intervalle de plus de cinq mois. Selon la dernière position observée du robot sur la planète Mars, Zhurong aurait parcouru un total de 1 921,5 mètres à la surface de la planète rouge. Les températures très basses à l'approche de l'hiver martien et l'accumulation de poussières sur les panneaux solaires, ont eût raison de Zhurong en lui donnant le cout de grâce. L'astromobile n'ayant tous simplement pas survécu aux conditions extrêmes de l'environnement martien. Selon les mesures locale, la température maximale à midi est tombée à -20 °C et la température ambiante durant la nuit est tombée en dessous de -100 °C, figeant à jamais le robot sur le sol martien. La différence d'altitude entre le site d'atterrissage et le point de rupture (Sol 361) est d'environ 5 mètres.

Durant tout ce temps d'attente, l'orbiteur de la mission Tianwen-1 a volé normalement pendant 706 jours, faisant 1 344 fois le tour de la planète Mars, et a acquis des données d'images à moyenne résolution couvrant l'ensemble de la planète Mars. La mission Tianwen-1 a obtenu un total d'environ 1 040 Go de données scientifiques fournis par les 13 charges utiles scientifiques embarqué sur le rover (6) et l'orbiteur (7). Étant la première mission chinoise d'exploration interplanétaire dirigée vers Mars, Tianwen-1 était particulièrement ambitieuse. Aucune nation n'avait tenté d'envoyer un orbiteur et un astromobile (rover) sur Mars du premier coup. Mais la Chine a réussi à relevé le défit avec succès, faisant de la mission Tianwen-1 une grande victoire historique et une très grande réussite sur le plan technologique et scientifique. Bravo au peuple chinois ! Une équipe scientifique de l'Académie des sciences chinoise avec le soutien de l'agence spatiale chinoise CNSA, a compilé des images (10 572 images sélectionnées sur les 14 757 images disponible) prises par la caméra MoRIC (Moderate Resolution Imaging Camera) de Tianwen-1 acquises jusqu'en juillet 2022 sur 284 orbites. Dans le but de dresser une carte globale de Mars avec une résolution de 76 mètres par pixel que le CNSA a publie le 24 avril 2023. La Terre n'ayant toujours pas encore reçu de signal de Zhurong plus de onze mois après la perte de contacte avec le rover. Le lendemain les responsables du programme spatiale chinois ont finalement annonce la fin de la mission le 25 avril 2023 (correspondant au Sol 703), soit deux mois après la publication des images de MRO sur le suivit de l'état du rover Zhurong sur Mars. Après avoir mené une activité scientifique à la surface de la planète Mars depuis 361 Sols avant de devenir silencieux durant les 342 Sols suivant dans l'espoir d'une éventuelle sortie d'hibernation. Le premier rover chinois sur Mars c'est figé à tout jamais dans les bases terres de la région sud d'Utopia Planitia, témoignage faisant preuve de l'épopée chinoise dans la banlieue martienne.

En utilisant les données recueillit par les spectromètres infrarouges (SWIR/LIBS) de l'unité de détection MarSCoDe à bord du rover Zhurong. Des preuves ont été trouvées sur la

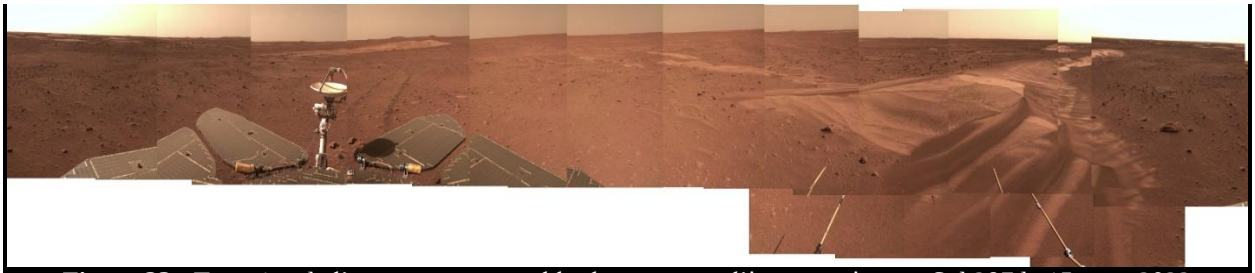
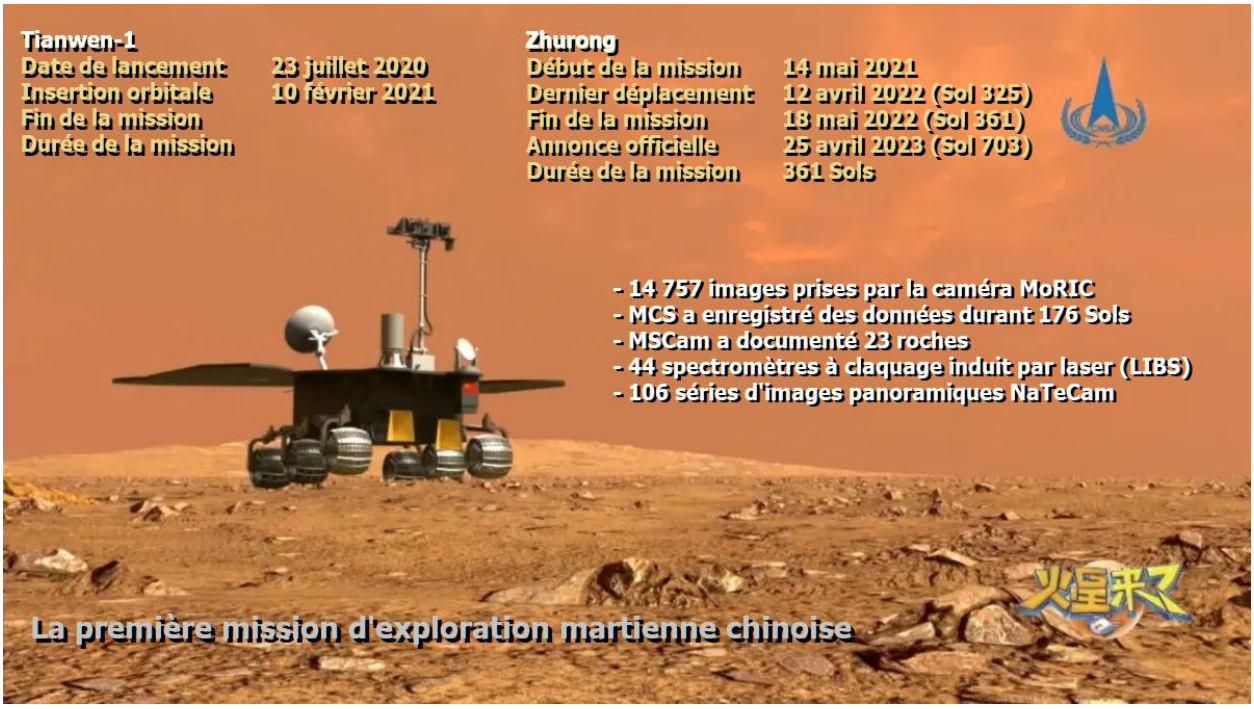


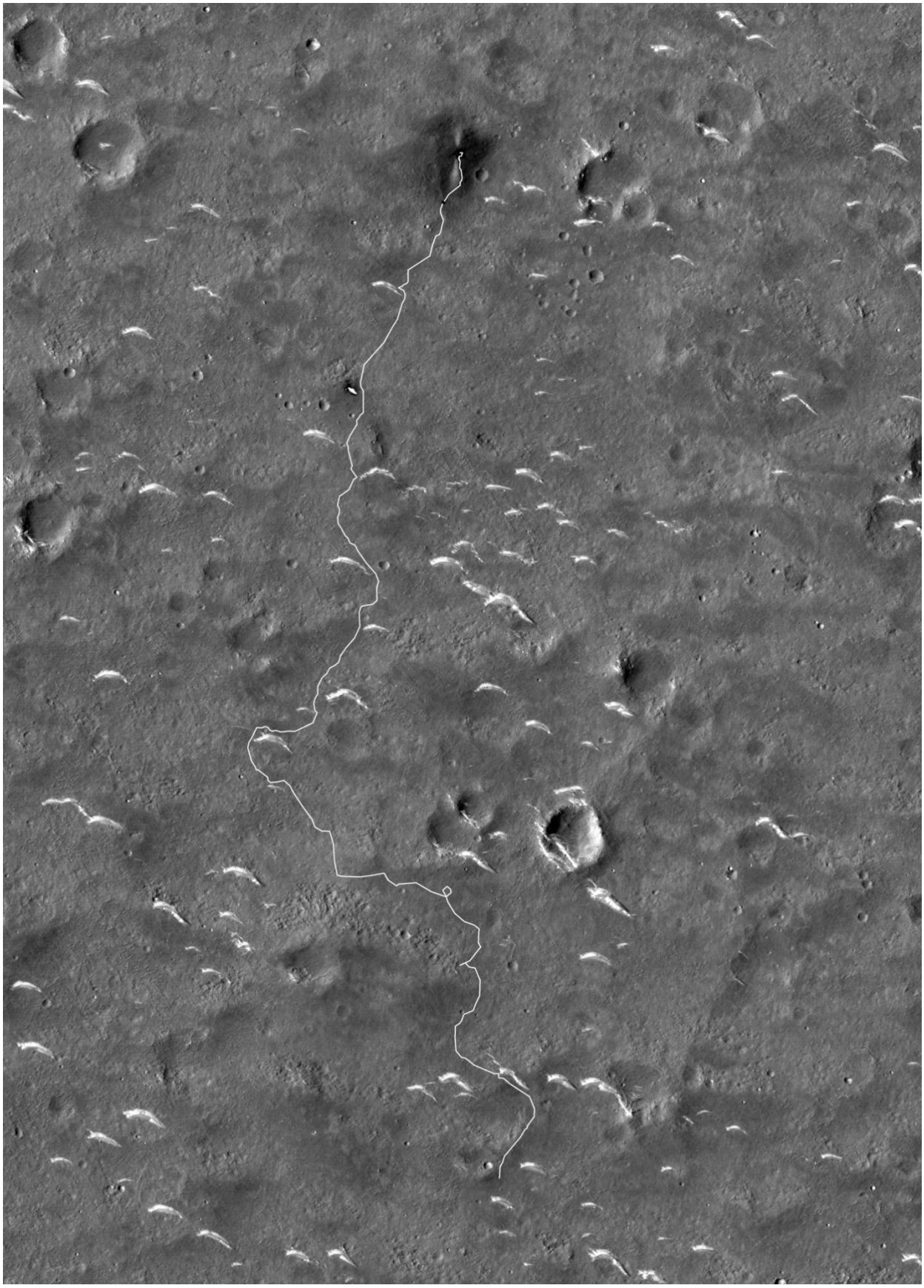
Figure 23 : Tentative de l'auteur pour assembler la mosaïque d'images prises au Sol 297 le 15 mars 2022 (Crédit : CNSA)

présence de minéraux hydratés autour du site d'atterrissage. Les résultats de Zhurong suggèrent que des activités aqueuses actives se sont produites pendant la période amazonienne globalement plus froide et plus sèche sur Mars. Suggérant que les dunes en forme de croissant (TAR) avec une surface encroûté recouvert de fissures polygonale riche en minéraux, notamment en sulfates (gypse) et en silice hydratée contenus dans des roches aux tons vifs découvertes par Zhurong et propice aux phénomènes hydrothermalisme. Auraient été formées il y a environ 400 000 à 1,4 million d'années[13]. L'échange de vapeur d'eau entre l'atmosphère et la surface de Mars et entre les latitudes supérieures et inférieures au cours des épisodes de forte obliquité de la planète, a conduit à des environnements humides répétés aux basses latitudes martiennes, suivis par l'apparition fréquente d'eau salée lorsque les températures ont chuté dans la région en suivant les cycles d'obliquité suivant ou entrant en résonance avec les autres cycles orbitaux comme la précession des équinoxes. Ces variations climatiques peuvent également avoir été le résultat de grande activité volcanique ou d'impacts objets célestes. Ses résultats s'ajoutent aux preuves de plus en plus nombreuses découvertes par les autres missions martiennes, que la planète rouge a traversé des cycles d'humidité et de chaleur alternant avec des périodes de sécheresse plus froide. Sur de plus courte périodes de temps, l'implication d'eau saline liquide formée par la fonte ultérieure du givre ou de neige tombant sur les surfaces des dunes contenant du sel aux files des années et des saisons aidé par le transfert de vapeur d'eau des calottes polaires vers l'équateur. Lorsqu'un refroidissement se produit les sels présents dans les dunes font fondre le gel et la neige à basse température pour former de l'eau liquide salée. Lorsque l'eau salée sèche, les minéraux hydratés précipités lient les particules de sable pour former des agrégats de sable et une croûte (duricrust). La croûte se fissure ensuite davantage par rétrécissement lors de l'évaporation des eaux souterraines et en fonction des variations brusques de température.

Les données recueillies par le radar à pénétration de sol RoSPR de Zhurong, qui envois une signale électromagnétique dans le sol pour ensuite en capter les signaux réfléchit par les roches souterraines pour les analyser. À révélé des preuves de cratères enfouis juste sous la surface, mais n'a pas montré de preuve sur l'existence de nappe d'eau liquide ou de glace emprisonnée sous la surface. Le rover Zhurong a également effectué des mesures vectorielles avec le magnétomètre RoMAG durant les 3 premier mois qui ont suivit l'atterrissage, exécutées sur 16 sites qui se trouvaient le long d'une trajectoire de 1 089 mètres parcourus en 90 Sols du 4 juin au 3 septembre 2021 (Sols 20-110). L'instrument a enregistré un champ magnétique extrêmement faible (inférieur à 30 nT), contrairement au grand champ magnétique d'Elysium Planitia mesuré par InSight.

[13] Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, 11 May 2022


Tianwen-1
Date de lancement 23 juillet 2020
Insertion orbitale 10 février 2021
Fin de la mission
Durée de la mission
Zhurong
Début de la mission 14 mai 2021
Dernier déplacement 12 avril 2022 (Sol 325)
Fin de la mission 18 mai 2022 (Sol 361)
Annonce officielle 25 avril 2023 (Sol 703)
Durée de la mission 361 Sols
- 14 757 images prises par la caméra MoRIC
- MCS a enregistré des données durant 176 Sols
- MSCam a documenté 23 roches
- 44 spectromètres à claquage induit par laser (LIBS)
- 106 séries d'images panoramiques NaTeCam
La première mission d'exploration martienne chinoise



Les Panoramiques de Mars 2020 Perseverance

La mission spatiale Mars 2020 Perseverance fait partie d'un vaste programme de retour d'échantillon martiens, développé par la NASA en collaboration avec l'ESA (Agence Spatiale Européenne). La programme sera composé d'un orbiteur dont le lancement est prévu pour 2027, suivis par un atterrisseur (Sample Retrieval Lander) en 2028. L'atterrisseur devra atterrir dans le cratère Jezero à proximité du lieu d'atterrissage de l'astromobile Perseverance. Il sera équipé de deux hélicoptères de type Ingenuity, qui aura pour tache de récupérer les tubes d'échantillons laissé à la surface de la planète Mars par le rover Perseverance. L'atterrisseur sera également équipé d'une petite fusée, qui devra produire sur place le carburant nécessaire à son décollage, et sur laquelle seraient chargés les échantillons collectés avant de prendre son envole pour rejoindre un autre vaisseau spatial en orbite autour de planète Mars (Earth Return Orbiter). Puis, si tout se passe comme prévue, de ramener les échantillons soigneusement sélectionnés sur Terre vers 2033, dont l'objectif final est de pouvoir effectuer sur Terre des analyses plus poussées des échantillons du sol martien grâce aux équipements lourds qui n'existent que sur notre planète. La NASA a sélectionné le cratère Jezero de 45 km de diamètre comme site d'atterrissage pour le rover Perseverance. Le cratère présente des signes d'écoulement d'eau et d'inondation faisant partie jadis d'un ancien delta fluvial, dont la source semble située plus au Nord dans le réseau de faille de « Nili Fossae ». Le cratère Jezero raconte l'histoire récurrente d'un passé humide sur Mars il y a plus de 3,5 milliards d'années, à l'époque ou des canaux fluviaux débordaient de ses parois pour former un lac en contre bas avec une profondeur estimé à plus de 250 mètres.

L'équipement du rover Perseverance :

L'astromobile Perseverance est basé sur la configuration de MSL-Curiosity de la taille d'une petite voiture de 1 025 kg (environ 3 mètres de long sur 2,7 mètres de large et de 2,2 mètres de haut). La mission de Mars 2020 Perceverance (Figure 1) est la première étape de cette vaste campagne de retour d'échantillon martien. L'astromobile est en réalité un véritable bijou de technologie, d'une très grande complexité sortant tout droit du génie humain. Un défit que l'ensemble des équipes ayant participée au projet ont réussit à surmonté et à relever avec brio et élégance. Un exemple de collaboration et d'union pour l'ensemble de l'humanité, face à une civilisation qui peut surmonter si elle le veut le défi de ses propres contradictions, et qui se trouve maintenant à la porte d'une véritable civilisation de type spatiale. Un changement de destiné fait de collaboration et de coopération unie dans un projet commun à dimension planétaire pour un

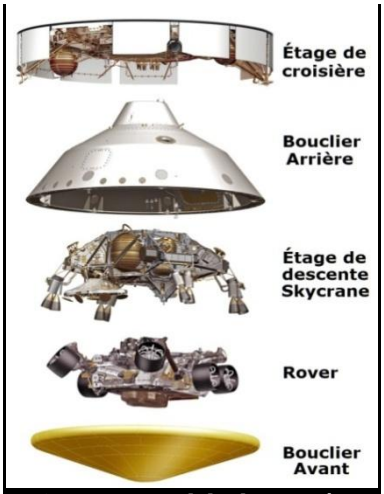


Figure 1 : Module de croisière (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

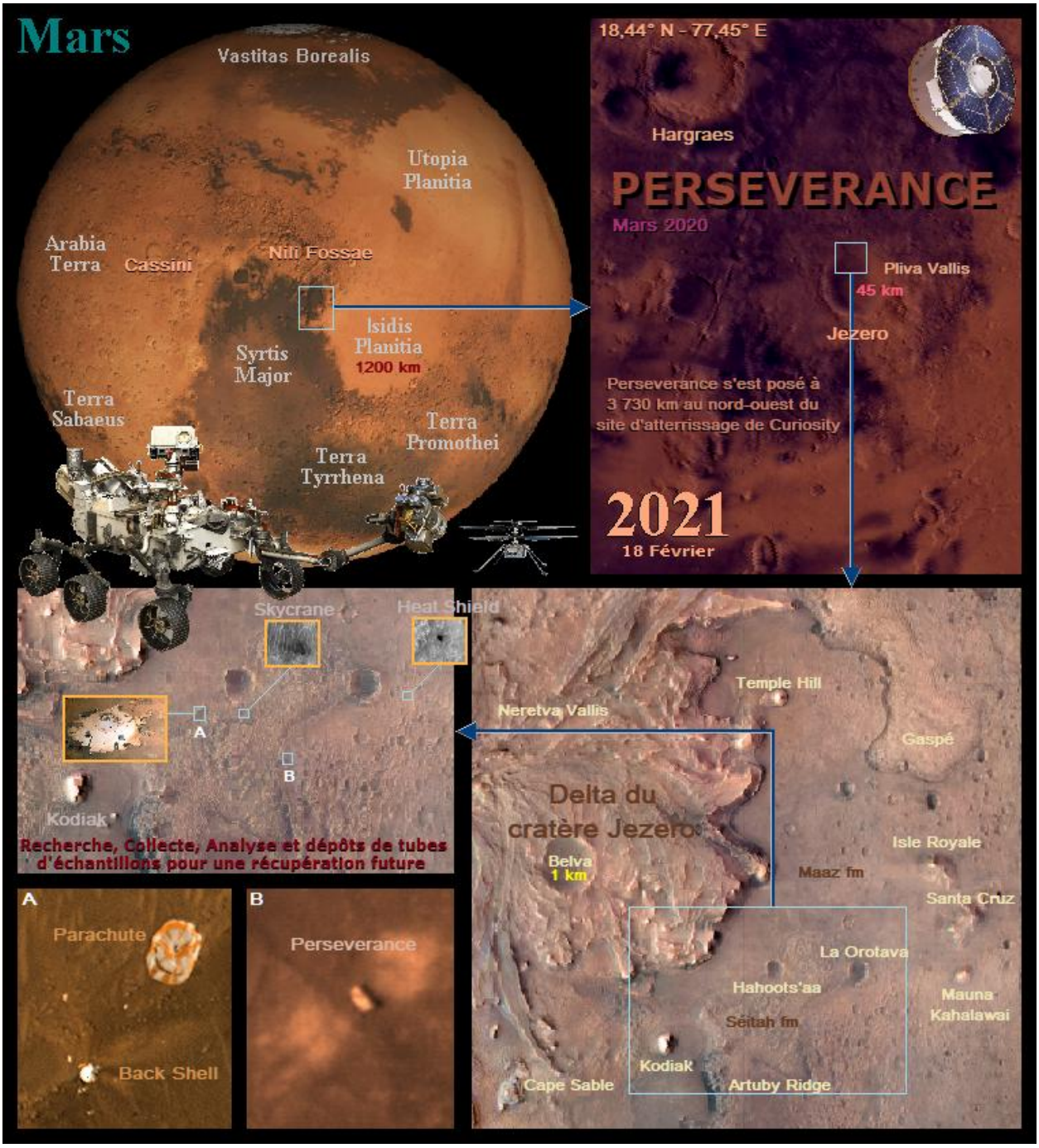


Planche 1 : Le site d'atterrissage de Mars 2020 Perseverance dans le cratère Jezero obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA (photo au centre à gauche et en bas à droite), et par la caméra HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 24 septembre 2021 pour les deux photos en bas à gauche. Les 2 photos du haut ayant participée au montage de cette maquette sont des orbiteurs Vikings.

avenir meilleur. Le rover à la mission de rechercher des signes de vie microbienne (bio-signatures) ancienne et fossilisé, de collectez et de mettre en cache des échantillons de roche et de régolithe (poussière et roche fracassé), et de déposé en grappe à certains endroit le long de son trajet sur Mars pour une éventuelle récupération pour un retour sur Terre. Pour ce faire,

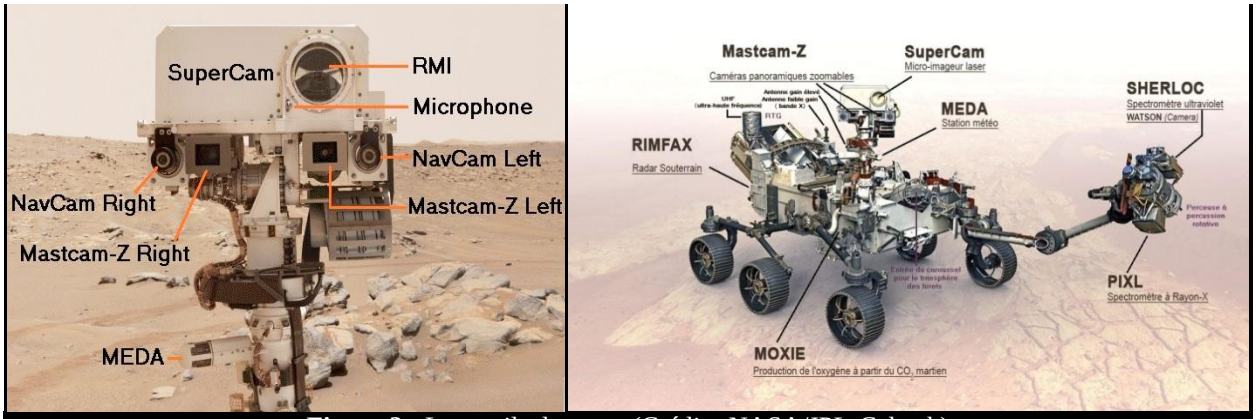


Figure 2 : Les outils du rover (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Perseverance est équipé de sept instruments scientifiques principaux qui vont servir à identifier les sites d'intérêts géologiques et les échantillons les plus intéressants. De 23 caméras pour sonder le terrain et pour l'aider dans ses déplacements sur le terrain. D'un bras robotique articulé (Robotic Arm) avec une tourelle rotatif (45 kg) porte outils, équipé d'une foreuse et de deux instruments pour faire des mesures spectrographiques (Figure 2).

Le premier instrument scientifique est l'analyseur de dynamique environnementale de Mars MEDA (Mars Environmental Dynamics Analyzer). Il s'agit d'une station métrologique installé sur le cou du mât et sur le pont, à l'avant et à l'intérieur du corps du rover fourni par l'Espagne. La station métrologique MEDA est composée d'un ensemble de capteurs qui permet de mesurer la température, la vitesse et la direction du vent, la pression et l'humidité relative. La station est également munie d'un capteur infrarouge thermique, et capable de faire la mesure de la taille et de la forme des grains de poussière. Les capteurs de l'humidité relative indiquent comment la vapeur d'eau s'échange entre le sol et l'atmosphère de Mars. Un Imageur radar en forme de nœud papillon est également embarqué sur l'astromobile pour faire l'expérience souterraine de Mars (RIMFAX), dont l'antenne est fixée sous le RTG dans la partie inférieure arrière du rover pointant vers le sol. L'antenne de RIMFAX émet des ondes radar (150 à 1 200 mégahertz) à pénétration de terrain pouvant pénétrer jusqu'à 10 mètres de profondeur, et analyse par la suite les échos émis du sol. L'expérience RIMFAX est destinée à sonder les caractéristiques des couches superficielles du sol martien, et de fournir des détails sur la structure géologique du sous-sol comme des poches d'eau ou de glace. Un système de deux caméras avancé Mastcam-Z[14], le Z signifie zoom, monté sur le mât du rover de 2 mètres de haut (RSM, Remote Sensing Mast), pouvant prendre des vidéos hautes définitions à grande vitesse pour permettre un examen détaillé des objets distants, avec la capacité de faire des images panoramiques couleur et des images stéréoscopique en 3D de la surface martienne (Figure 3). Le mât de Perseverance est construit

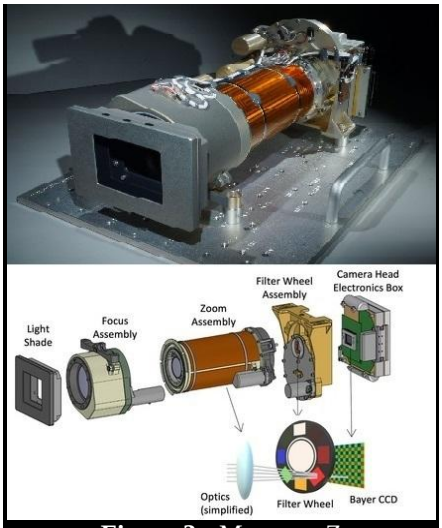


Figure 3 : Mastcam-Z (Crédit : NASA/JPL/ASU/Jim Bell)

[14] The Mars 2020 Perseverance Rover Mast Camera Zoom (Mastcam-Z) Multispectral, Stereoscopic Imaging Investigation, 15 February 2021

principalement à partir des pièces de rechange provenant du rover Curiosity. Ce sont les premières caméras envoyées sur Mars avec une capacité de zoom intégrée avec mise au point (distance focale de 26 millimètres et 110 millimètres), et capable de passer d'un grand angle à une vue rapprochée. L'instrument aide à évaluer la minéralogie de la surface martienne et de participer aux opérations du rover. Le système Entry Descent and Landing (EDL) de Mars 2020 Perseverance est similaire à celui de son prédécesseur Mars Science Laboratory (MSL-Curiosity). En plus d'une suite de caméras placées sur différentes parties du vaisseau spatial pour surveiller et documenter la rentrée atmosphérique. L'astromobile embarque comme charge utile des microphones située de chaque côté du robot avec lequel il peut enregistrer des sons. Les microphones enregistrent les bruits de Perseverance lors de la descente vers la surface, des sons causés par la friction de l'atmosphère, les vents et les bruits de poussière déplacés par les propulseurs lorsque le rover atterrit sur la planète rouge.

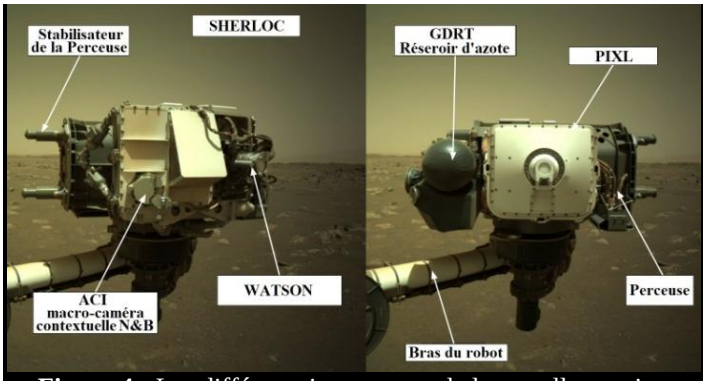


Figure 4 : Les différents instruments de la tourelle rotative (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Perseverance possède trois instruments scientifiques dédié à la spectroscopie installés soit sur la tête du mât de l'astromobile (micro-imager laser SperCam), ou sur la tourelle rotative du bras robotique du rover (SHERLOC et PIXL). Ils sont utilisés pour sonder et aider à déterminer la composition chimique et minéralogique élémentaire des échantillons, et leur partie électronique est maintenue bien au chaud dans le corps de l'astromobile. Il s'agit du spectromètre d'ablation laser à fluorescence X (PIXL : Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry) (Figure 4:B), ou des atomes d'un matériau sont excités par l'absorption de photon du faisceau laser du spectromètre (ablation), qui est immédiatement suivit d'une émission spontanée (fluorescence) lorsque ses derniers redescendes à leurs niveau d'énergie initiale. Il s'agit d'une technique spectroscopique (XRF) utilisé pour faire de la lithochimie axée sur l'identification chimique des minéraux aux rayons X. L'instrument dispose également d'une caméra micro-contextuelle de haute résolution (MCC), capable de prendre des images tricolore ou en noir & blanc pouvant être co-alignées aux cartes spectrale (XRF) pour aider à déterminer la texture à petite échelle à la surface des roches et du sol martienne. Le spectromètre bombarde une cible avec un faisceau de rayons X de 120 µm de diamètre (7,5 keV), un peut comme les spectromètres APXS des rover MER et Curiosity mais sans les rayons alpha, et récupérer ensuite l'énergie qui est réémit pour en faire une analyse chimique, soit un rayonnement X qui est absorbé et immédiatement réémit par fluorescence ou comme émission secondaire.

Le spectromètre Raman SHERLOC (Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals)[15] logé sur la tourelle situé au bout du bras articulé de Perseverance (Figure 4:A), est dédié à faire des analyses sur l'environnement habitable avec la spectroscopie Raman et luminescence pour identifier les produits organiques et chimiques. L'instrument est muni de deux caméras, soit d'une macro-caméra contextuelle autofocus noir et

[15] Perseverance's Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals (SHERLOC) Investigation, 25 May 2021

blanc (ACI) pour prendre des plans très rapprochés des zones étudiées, assistée par la caméra couleur WATSON (Wide Angle Topographic Sensor for Operations and eNgineering) muni de capteur topographique grand angle presque identique à l'appareil photo MAHLI du rover Curiosity. La caméra WATSON (capteur topographique grand angle pour les opérations et l'ingénierie) permet de prendre des images rapprochées des grains de roche et des textures à la surface martienne. Le spectromètre fournit une imagerie à petite échelle et utilise un faisceau laser ultraviolet (UV) de 248,6 nm pour déterminer la minéralogie et à détecter des composés organiques. Le laser du spectromètre envoie une lumière monochromatique (laser ultraviolet de 532 nm) sur une cible et analyse par la suite le décalage de la fréquence de la lumière diffusée par luminescence (l'effet Raman), pouvant servir à déterminer la composition moléculaire (organique et chimique) et la structure externe de l'échantillon via les modes vibrationnels des molécules. SHERLOC est le premier spectromètre UV Raman à voler à la surface de Mars et à fournir des mesures complémentaires avec d'autres instruments de la charge utile de l'astromobile. Le troisième spectromètre est le spectromètre infrarouge du micro-imager laser SuperCam logé au sommet du mât du rover.

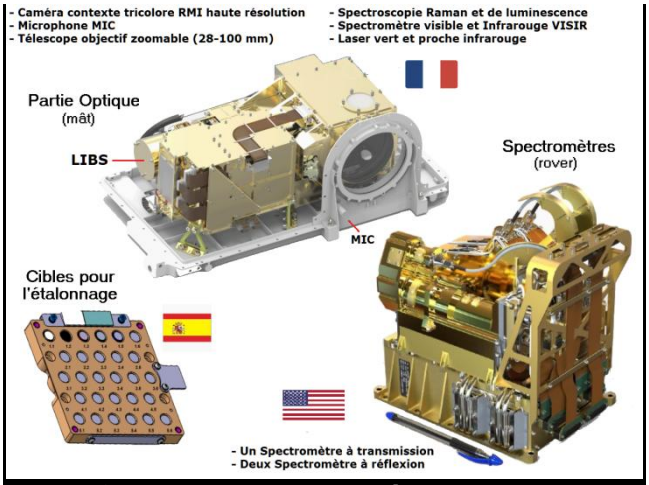


Figure 5 : Le Micro-imager laser SuperCam (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Dans l'optique nous retrouvons le micro-imager laser SuperCam (Remote Micro-Imager)[16], dont une partie est fixé au sommet du mât et l'autre est contenue dans le corps de l'astromobile relié par une fibre optique. L'instrument est composé de trois sous-systèmes distincts, soit l'unité du mât conçue par la France (Figure 5), l'unité installé dans le corps du robot fournie par les États-Unis et le support de cible d'étalonnage donné par l'Espagne. La partie américaine de SuperCam qui se trouve dans le ventre de Perseverance, contient trois spectromètres et le boîtier électronique qui fournis l'alimentation à la partie du mât, jouant le rôle d'interface entre les appareils et l'ordinateur de bord de l'astromobile[17]. Il est composé d'un spectromètre à transmission et de deux spectromètres à réflexion, qui couvrent les plages spectrales ultraviolette (UV), violette (VIO), verte, orange et rouge. L'instrument fournit de la spectroscopie et de l'imagerie servant à faire l'analyse de la composition chimique et de la minéralogie de cible de roche ou de sol sélectionnées. Le micro-imager laser SuperCam possède un microphone (MIC) placé sous la lentille de la caméra du côté gauche pour enregistrer les premiers sons sur Mars (entre 100 Hz et 10 kHz), composés de vent, du hurlement grave des diables de poussière (Dust Devils), de bruits de rover et du zaps du laser. L'appareil peut détecter à distance (entre 2 à 7 mètres) la présence de composés organiques dans les roches et le régolithe (composé de poussière et de roche fracassé). Cet instrument bénéficie d'une contribution française significative via le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie France (IRAP) qui a conçus et testé l'appareil.

[16] The SuperCam Instrument Suite on the Mars 2020 Rover: Science Objectives and Mast-Unit Description, 2021
[17] The SuperCam Instrument Suite on the NASA Mars 2020 Rover: Body Unit and Combined System Tests, 21 December 2020

La partie du mât du micro-imager laser SuperCam est une version améliorée de la caméra ChemCam du robot Curiosity pour faire des analyses minéralogiques et chimiques élémentaire, il est capable de faire des observations complémentaires via la spectroscopie à claquage induit par laser (LIBS). Pour l'aider dans cette tâche, le micro-imager laser SuperCam est assistée par cinq instruments. Soit un spectromètre dédié à la spectroscopie Raman à luminescence (avec un laser vert pulsé) et un spectromètre visible et infrarouge (VISIR), qui analysera la lumière réfléchie par le sol de Mars dans le but d'identifier les structures minérales et organiques (carbonates, sulfates et phosphates). L'instrument est composé d'un système optique muni d'un zoom (télescope avec objectif de 28-100 mm), d'un laser, et d'une caméra de contexte tricolore haute résolution RMI (Remote Micro-Imager) à petit champ de vision pour documenter les différentes analyses spectrales (morphologie, texture). Le module LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) de SuperCam a été amélioré par rapport à ChemCam du rover Curiositty, il fonctionne sur une plage spectrale comprise de 532 à 900 nm. Le laser utilisé pour l'ablation était de couleur verte pour Curiosity (532 nm), tandis que le laser de SperCam utilise une deuxième longueur d'onde en plus de la verte qui se situe dans le proche infrarouge (1 064 nm), avec la capacité d'effectué des séquences de tirs laser plus rapidement que ChemCam de Curiosity.

Lorsque SuperCam déclenche des impulsions laser de très forte intensité sur une cible de roche ou de sol, une petite quantité de matière est vaporisé sous l'impacte en créant un petit nuage de gaz très chaud (plasma) qui se dilate à une vitesse supersonique, composé d'ions et d'électrons flottant librement qui en se recombinant vont émettre de la lumière (photon de luminescent) sur différentes longueur d'onde. La chaleur et les vibrations créent une onde de choc qui produit un petit bruit sec, qui va être enregistré par le microphone. Les photons émis par les atomes ionisés du plasma collectés par le télescope de SuperCam, sont ensuite dirigés par un miroir pour être acheminés à travers un faisceau de fibres optiques à l'intérieur du robot. Les photons sont par la suite analysés par des spectromètres qui vont faire l'analyse spectrale de la composition chimique élémentaire de la cible. Le bruit produit lors de l'impact du faisceau laser sur la cible peut donner des renseignements sur la masse et la composition de la roche, ainsi que sur les conditions de pression impliquée lors de leur formation. L'intensité du sons révèle la dureté relative des roches, qui renseigner à son tour dans quel contexte environnemental à eut lieu leur formation, à savoir dans un sédiment situé au fond d'un lac pour les roches dure et compacte, ou plutôt à partir d'un empilement finement feuilleté de couche de matériau sédimentaire éolien peu dense poussé par le vent.

Perseverance dispose de 23 caméras[18] (Figure 6) axées sur des tâches d'ingénierie (9) et scientifiques (7), dont 19 d'entre elles sont installées sur l'astromobile[19]. Dans un premier temps il y a la suite des six caméras d'entrée, de descente et d'atterrissage (EDL), qui comprend trois caméras de parachute (PUC) montées sur la coque arrière (Back Shell), qui regarde vers le haut pour vérifier l'état du déploiement et du gonflage du parachute. Sur les trois caméras installées, deux ont réussi à enregistrer et filmer l'ouverture du parachute. Une quatrième caméra est fixée sous l'étage de descente (DDC), qui a été abaissée pour regarder vers le bas afin de documenter les manœuvres de l'étage de descente Skycrane. Une cinquième caméra est montée sur le pont supérieur du rover (RUC), qui regarde vers le haut au niveau de l'étage de descente pendant les

[18] NASA, Spacecraft › Instruments, les caméras
[19] The Mars 2020 Engineering Cameras and Microphone on the Perseverance Rover: A Next-Generation Imaging System for Mars Exploration, 24 November 2020

manœuvres de Skycrane, et pour documenter la séparation de l'étage de descente quand le rover touche le sol. La dernière caméra impliquée dans la phase EDL est montée sous le rover dans le coin gauche avant (RDC), elle est orientée « vers le bas » pour visualiser la surface durant l'atterrissage. Une caméra à grand angle noir & blanc (LCAM) est monté sous le coin droit avant du robot pointant vers le bas. Cette caméra fait partie du système de navigation relative au terrain (LVS), qui est activée vers une altitude de 4 km lors de la phase finale de l'atterrissage, dans le but d'aider à la sélection d'une trajectoire de descente optimum et propice à l'atterrissage sur un terrain plat.

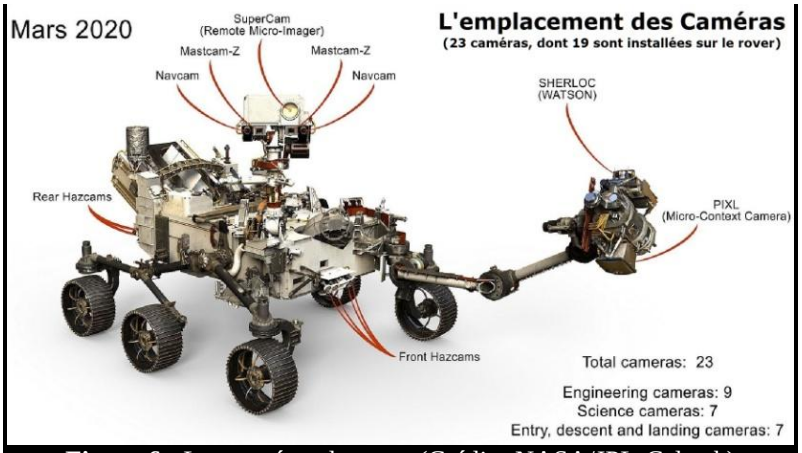


Figure 6 : Les caméras du rover (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Viens ensuite les deux caméras stéréo couleur dédiées à l'ingénierie de conduite et de navigation (NavCam) installé au sommet du mât sous la SuperCam, elles son espacés d'environ 42 centimètres pour donner une vision stéréoscopique et des images 3D (Figure 2). Les NavCams aident également à placer les différents instruments installés sur la tourelle du bras robotique articulé près de leurs cibles. L'astromobile possède six caméras couleur d'évitement des dangers (HazCam) qui aide également à la navigation autonome, quatre d'entre elle sont placés à l'avant du corps de rover (Front HazCams) et deux à l'arrière (Rear HazCams) visant le sol se trouant devant eux. Les NavCams et HazCams de Mars 2020 offrent trois améliorations principales par rapport aux rover MER (Spirit et Opportunity) et à MSL. La première amélioration est une mise à niveau vers un détecteur doté d'une capacité couleur, qui permet une meilleure capacité d'imagerie contextuelle que les caméras précédentes (qui n'avaient qu'une capacité N&B). La deuxième amélioration est un champ de vision (FOV) plus large, qui améliore la qualité des mosaïques dans l'élaboration d'images panoramiques de 360°. La troisième et dernière amélioration est une échelle de pixellisation angulaires plus fine. Toutes les caméras NavCam et HazCam pour MER, MSL et Perseverance ont été construites au Jet Propulsion Laboratory au California Institute of Technology à Pasadena en Californie.

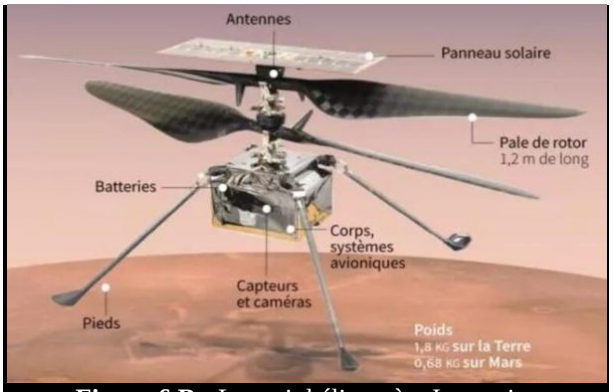


Figure 6 B : Le petit hélicoptère Ingunuity (Crédit : NASA/JPL-Caltech/AFP/VNA/CVN)

Lorsque le rover conduit sur le terrain, il s'arrête fréquemment pour prendre de nouvelles images stéréo du chemin à parcourir afin d'évaluer les dangers potentiels. Les vues numériques modélisées en 3D des images des HazCams couplés aux images des caméras NavCams, donnent la possibilité à l'intelligence artificielle du robot à prendre ses propres décisions pour contourner de petits obstacle qui se trouve devant lui, et de poursuivre seul la conduire sur le terrain en calculant la distance à partir des rotations des roues, et tout ça sans avoir besoin de l'intervention d'un opérateur depuis la Terre. La caméra CacheCam à focale fixe

est installée à l'intérieur du ventre du rover en haut du cache d'échantillons. L'imageur est dédié à l'inspection et à la documentation des échantillons en prenant des photos microscopiques du dessus des tubes durant leurs préparations pour voir les matériaux échantillonnés après le prélèvement, et avant qu'ils soient scellés et mises en cache. Et pour finir cette énumération, le robot est équipé d'une caméra SkyCam pour l'instrument MEDA fixé sur le pont dédié à photographier le ciel et les nuages, et de cinq caméras scientifiques déjà décrites plus haut (Mastcam-Z, SuperCam, PIXL, SHERLOC et WATSON). Le petit hélicoptère Ingenuity (Figure 6 B) est équipé de deux caméras pour immortaliser les premiers vols effectués sur la planète Mars, soit une caméra couleur haute définition fixé sous l'appareil pour les images de la surface et une caméra noir et blanc dédié à la navigation.

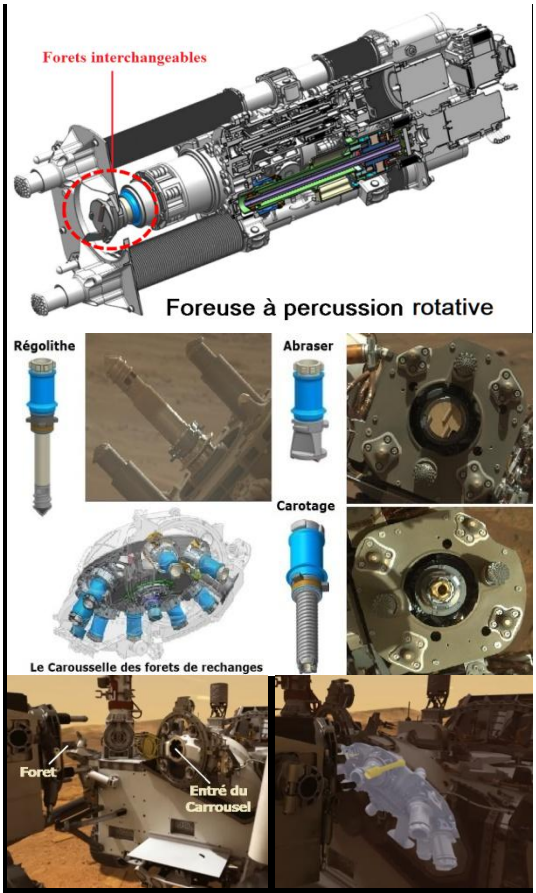


Figure 7 : Foreuse, le carrousel et les forets (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le bras robotique d'une longueur de 2,1 mètres possède cinq degrés de liberté. Les articulations du bras (épaule, coudes et poignets) sont actionnées par cinq petits moteurs (actionneurs rotatifs) pour donner une flexibilité maximale. Les cinq degrés de liberté sont appelés articulation azimutale de l'épaule, articulation d'élévation de l'épaule, articulation du coude, articulation du poignet et articulation de la tourelle. Une tourelle porte outils est installée à l'extrémité du bras robotique qui abrite trois instruments scientifiques (SHERLOC, WATSON et PIXL) et deux outils. Soit une perceuse à percussion rotative versatile, pouvant exécuter trois types d'opération d'échantillonnage à l'aide de forets interchangeables (abrasion/grattage et carottage), et d'un outil de dépoussiérage gazeux (gDRT). La tourelle dispose également d'un capteur spécial qui empêche les instruments d'entrer en contacte et d'être endommager lors de leur positionnement près de leur cible. Le capteur de contact est également conçu pour immobiliser le bras s'il venait à toucher le sol par inadvertance. L'astromobile Perseverance est équipé d'une foreuse et d'une suite de forets vide interchangeables (Figure 7), soit pour créer des zones abrasées, ou de pénétrer la surface d'une cible pour collecter des carottes de roche ou du régolithe. La foreuse possède des forets de rechange selon les besoins relié au type de forage à effectué. Ils sont rangés dans le carrousel rotatif du système de collecte d'échantillons qui comporte des emplacements pour 5 forets de carottage, 2 forets abrasifs pour la préparation et le nettoyage de la surface avant prélèvement, un emplacement vide pour la réception des forets aux tubes remplit d'échantillon, et un foret spécial adapté au prélèvement du régolite martien. Lors de l'identification d'une cible d'intérêt géologique, la foreuse commence par nettoyer la couche supérieure en mode rotation ou percutions avec le foret abrasif en acier équipé de trois dents disposé en lignes parallèles de longueurs différentes. La surface abrasée de 5 cm de diamètre est ensuite nettoyé des résidus de poussière et du sable générée lors de l'abrasion à l'aide de l'outil de dépoussiérage gDRT. Le gDRT dispose d'un réservoir d'azote sous forme gazeuse qu'il utilise

pour produire une petite séquence de jet de quatre tirs pour souffler les débris, afin d'exposer une surface fraîche et propre non altérées à des fins d'étude. Le rover peut alors sélectionner un foret de carottage pour la perceuse, ou de poursuivre une campagne d'étude et d'analyse avec les autres instruments.

Figure 8 : Tube de stockage (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Les forets ou mèches de carottage et de régolithe sont utilisés pour collecter des échantillons martiens directement dans un tube de prélèvement d'échantillons déjà incéré dans le foret. La foreuse utilise le foret cylindrique pour prélever une carotte d'échantillonnage d'un diamètre de 27 mm creusé à l'intérieur d'une roche (Figure 8). Chaque échantillon est collecté directement dans un tube de prélèvement d'échantillon propre, avec un espace de 1,3 cm de diamètre sur 6 cm de long, soit en moyenne entre 10 à 15 grammes de matériau par tube. Un foret spécial est utilisé pour collecter le régolithe, contrairement au foret de carottage qui est ouvert à son extrémité. Le foret pour l'échantillonnage de régolithe est fermé à l'avant et dispose de deux petites entrées sur le côté pour laisser s'écoulé le régolithe à l'intérieur. Et comme pour les échantillons de carottage de roche, les échantillons de régolithe sont collectés directement dans un tube de prélèvement d'échantillons propre qui est déjà incéré dans le foret. Pour transférer le régolithe dans le tube, la tourelle se met en position verticale et fait tourner le foret à l'envers avec des éclats de percussion occasionnels pour faire couler le régolithe dans le tube. Le bras robotique place ensuite le foret en face de l'entrer du carrousel rotatif du système de collecte d'échantillons[20], qui se trouve en haut sur le côté droit de la partie avant de Perseverance, pour y transférer le foret contenant le tube avec l'échantillon récolté. Le carrousel du dispositif de prélèvement d'échantillons, qui joue le rôle d'interface entre le monde du dehors et de l'intérieur, tourne sur lui-même pour transférer l'échantillon récolté à l'intérieur du rover ou un petit bras robotique interne (SHA) viendra le récupérer en récupérant le tube.

Chaque tube d'échantillonnage individuel en titane est automatiquement placé dans un espace pour être étudier et photographier par la caméra CacheCam, et préparé pour être hermétiquement scellé par un capuchon métallique à l'intérieur du rover par le système d'échantillonnage et de mise en cache (Figure 8 B). Pour mener à bien la manipulation des échantillons, l'astromobile embarquait un système complet de prélèvement et de manipulation d'échantillons (SCS : Sample Caching System, en français : Dispositif de prélèvement d'échantillons). Il s'agit d'un dispositif sophistiqué et ultra-complexe de prélèvement d'échantillons composé de 43 tubes d'échantillonnages (dont 5 tubes témoins) installé bien à l'abri dans le corps du rover sous la partie avant de l'astromobile. Le système a pour tâche la préparation des surfaces avant prélèvement, du carottage, du scellement étanche des échantillons dans des tubes individuels, du stockage, et pour finir de déposer les tubes à la surface de Mars dans des secteurs bien identifié (zone de dépôts) pour une éventuelle mission de récupération. Le dispositif de prélèvement d'échantillons contient un carrousel de forets rotatif, qui est une roue contenant différents types de forets et un espace de rangement vide pour réceptionner les forets

[20] NASA's Perseverance Mars Rover Sample Caching System

après la collecte d'un échantillon. Les tubes témoins qui contiennent des échantillons de sol terrestre stérilisés ou des tubes vides, seront ouverts et exposé à l'environnement ambiant à différents endroits durant le trajet du rover à la surface martienne, dans le but de documenter la propreté du système d'échantillonnage tout au long de la mission, et ils vont servir de comparaison entre les sites situé à proximité des zones de prélèvement d'échantillons.

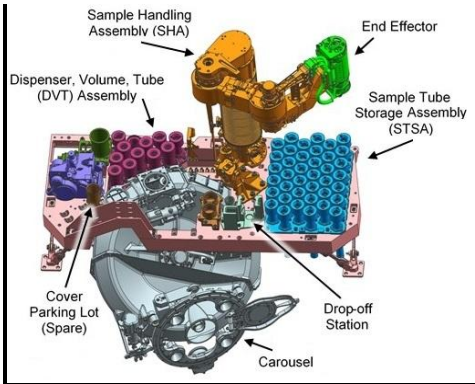


Figure 8 B : Le système de mise en cache (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Pour manipulé les tubes, le dispositif de prélèvement d'échantillons utilise un petit bras robotique interne SHA (Sample Handling Assembly) long de 0,5 mètre et disposant de trois degrés de liberté (Figure 8 B). Il ramasse et déplace les nouveaux tubes d'échantillonnage vide et stérile au niveau de la zone de stockage pour les incéré dans l'un des forets vides du carrousel, qui seront de nouveau rempli lors d'un nouveau forage. Puis, il transfère les tubes contenant des échantillons vers les stations d'inspection et de scellement (mise en cache d'échantillons), où l'échantillon va être photographié par la caméra CacheCam de la station d'inspection et les tubes sont scellés puis stockés (Sample Tube Storage). Une fois les tubes sont hermétiquement scellés, rien ne peut y entrer ni en sortir. Les tubes sont stockés dans le ventre du rover jusqu'à ce que l'équipe décide de l'heure et du lieu du dépôt des échantillons à la surface de la planète Mars, déposé à l'aide du petit bras robotique SHA. L'ensemble du dispositif sera exposé à l'atmosphère martienne après le largage du couvercle de protection du système de collecte et de stockage des échantillons, qui se trouve sous le ventre du robot. Cette architecture permet également de dégager l'espace et de permettre par la suite de déposer les tubes sur le sol martien toujours avec l'aide du bras robotique SHA[21].

Deux expériences seront testées sur le terrain avec des technologies innovantes avant leur mise en œuvre dans les prochaines missions. Il s'agit de l'expérience d'utilisation des ressources in situ sur Mars Oxygen (MOXIE). Une véritable petite usine chimique pouvant fabriquer de l'oxygène à partir du dioxyde de carbone puisé dans l'atmosphère martienne. L'oxygène peut servir à respirer, ou agir comme oxydant pour brulé un carburant produit sur place. Il s'agit d'une expérience de démonstration technologique et d'exploration servant à tester la faisabilité de ce procéder d'extraction dans le but de préparer une prochaine mission de retour d'échantillon. Perseverance est également équipé d'un petit hélicoptère de démonstration dénommé Ingenuity (Figure 6 B), qui tire son énergie de batteries rechargeable fournis par un petit panneau solaire fixé au sommet, afin de tester les capacités d'un engin aérien dans l'atmosphère très ténue de Mars. Il est muni d'une petite antenne émetteur-récepteur radio sur bande UHF et de deux caméras d'une portée d'environ un kilomètre.

Pour les communications, Perseverance possède trois antennes situées sur le pont arrière de l'astromobile[22]. Il faut en générale entre 5 à 20 minutes à un signal radio, et selon les positions respectives des planètes, pour franchir la distance entre Mars et la Terre. Le rover est équipé d'une antenne cylindrique omnidirectionnelle ultra-haute fréquence UHF (d'environ 400

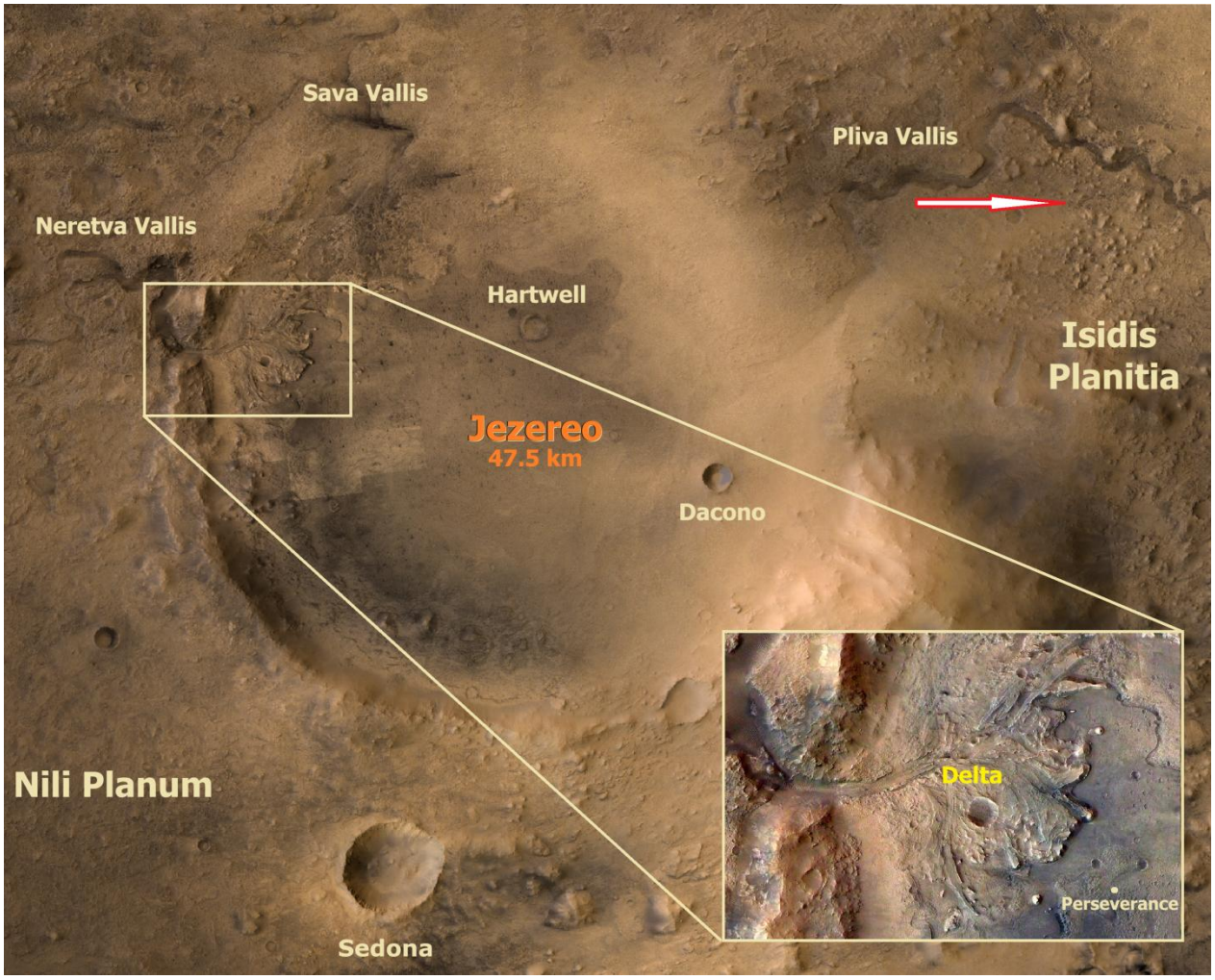
[21] Mars 2020 Rover Adaptive Caching Assembly: Caching Martian Samples for Potential Earth Return
[22] NASA : Vaisseau spatial › Rover

mégahertz) qui permet de transmettre à haut débit des informations aux orbiteurs martiens servant de relais (Mars Reconnaissance Orbiter, MAVEN, Mars Odyssey, Trace Gaz Orbiter et Mars Express). Perseverance dispose également d'une antenne hexagonale orientable à gain élevé émettant en bande X (7 à 8 gigahertz) lui permettant de communiquer directement avec la Terre. Ainsi qu'une antenne à faible gain omnidirectionnelle principalement pour recevoir des signaux fonctionnant aussi en bande X (7 à 8 gigahertz). Cette antenne peut envoyer et recevoir des informations dans toutes les directions.

Tout comme l'astromobile Curiosity, Perseverance tire son énergie d'un générateur thermoélectrique radio-isotopique (RTG) d'une durée de vie opérationnel de 14 ans (pouvant généré 100 watts d'électricité), ce qui met le robot à l'abri des redoutables tempêtes de poussière qui peuvent parfois obscurcir le ciel martien, des nuits glaciales et de la rigueur de la saison hivernale. Le RTG utilise la décomposition radioactive de l'oxyde de plutonium (PuO_2) enrichie en plutonium 238 (demi-vie de 87,7 ans) sous forme de pastilles de céramique pour produire de la chaleur et de l'électricité, et permettant également de recharger ses deux batteries au lithium. Le RTG génère une puissance initiale de 2 000 Watts thermiques convertis en 120 Watts électriques par des thermocouples, au final le rover ne dispose que d'une puissance de 2,7 kWh/j. Un système de radiateurs comportant près de cinquante mètres de tubes ou circule un fluide caloporteur permet de réchauffer Perseverance dans les nuits froide hivernale, et dont le surplus de chaleur est évacuée grâce aux ailerons du RTG. Les batteries sont plus sensible au froid et doivent être gardé au-dessus de -20 °C, et les instruments situés à l'extérieur du corps du rover ou sur la tourelle du bras, sont chauffés grâce à des résistances chauffantes de puissance variable (de 5 à 10 watts).

Les roches martiennes carbonatées sont des indicateurs clés des interactions passées entre l'eau, la roche et l'atmosphère. Elles conservent des informations détaillées sur le climat ancien et les environnements habitables, et constituent de ce fait une priorité pour l'exploration des missions d'atterrissage sur Mars, avec pour objectif supplémentaire de préparer le retour d'échantillons sur Terre. La détection de phases minérales carbonatées depuis l'orbite a été déterminante pour le choix du cratère « Jezero » comme site d'atterrissage de la mission Mars 2020, et qui c'est effectué entre autre par le spectromètre d'émission thermique (TES) de la sonde américaine Global Surveyor (MGS) en 2003, du spectro-imageur OMEGA (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité) à bord de la sonde Mars Express de l'Agence spatiale européenne en 2009, et grâce à l'instrument CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) à bord de la sonde américaine MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) en 2008. En effet, ce cratère d'âge noachien se situe au sein de la plus grande unité riche en carbonates détectée sur Mars depuis l'orbite, notamment dans les affleurements exceptionnellement de roches riches en carbonates de la région de « Nili Fossae » (la plus vaste concentration d'olivine sur Mars). Outre la région de « Nili Fossae », des carbonates ont été observés en particulier dans le contexte d'affleurements profonds de la croûte martienne, par exemple en association avec des cratères exposant des roches noachiennes, et dans le cadre de profils d'altération des terrains noachiens tardifs, mais globalement dans des affleurements spatialement limités. Des carbonates ont également été détectés sur les sites d'atterrissage de plusieurs missions in situ. Tout d'abord, sur le site d'atterrissage de Phoenix ou l'atterrisseur a détecté de faibles quantités de carbonates de calcium dans le sol polaire martien (3 à 5 % en poids) à l'aide de l'instrument Thermal and Evolved-Gas Analyzer (TEGA). Et dans l'affleurement « Comanche » dans les collines Columbia du cratère « Gusev » explorées par le

rover MER Spirit (affleurement riche en carbonate de fer et de magnésium, 16 à 34 % en poids), grâce aux instruments Alpha Particle X-ray Spectrometer et Miniature Thermal Emission Spectrometer (Mini-TES). Dans le cratère « Gale », exploré par le rover Curiosity, des carbonates de fer et de magnésium ont été détectés dans les dépôts lacustres et éoliens du cratère « Gale » par spectrométrie de masse SAM dans le régolithe; du carbonate riche en fer a été détecté en faible quantité dans l'unité argileuse de « Glen Torridon », et de la sidérite a été formellement identifiée par diffraction des rayons X à l'aide du diffractomètre CheMin dans la « bande marqueur » de l'unité sulfatée[23].



[23] In Situ Carbonation of Sedimentary and Igneous Rocks of Ultramafic Composition in Jezero Crater, 24 April 2026

Décollage, Transite et Atterrissage

Figure 9 : Décollage de Perseverance (Crédit : United Launch Alliance)

Le rover Perseverance a été lancé le 30 juillet 2020 à 11h50 UTC, par une fusée Atlas V-541 depuis le complexe de lancement 41 de la base aérienne de Cap Canaveral en Floride (Figure 9). Il s'agit du même type de fusée qui a lancé InSight et Curiosity vers Mars. Le lanceur a été fourni par United Launch Alliance, Centennial Colorado. Le rover est maintenu en position replié durant le transite, et est alimenté en électricité grâce à un large panneau solaire qui coiffe l'étage de croisière. Les antennes radio maintiennent le véhicule en contact avec la Terre, et les réservoirs de carburant et les petits propulseurs de l'étage de croisière lui permettent d'ajuster la trajectoire durant la phase de croisière. Après une phase de croisière dans la froideur de l'espace interplanétaire de plus de 7 mois (203 jours), avec une distance parcourue de plus de 472 millions de kilomètres et plusieurs petites corrections de trajectoires (TCM) durant le trajet (Figure 12 B). Le rover qui est toujours en position replié dans la capsule de descente durant le transite, filant à plus de 20 000 kilomètres par heure, se sépare de l'étage de croisière à environ 1 600 km de la planète, soit dix minutes avant de d'atteindre les couches supérieures de l'atmosphère martienne. L'entrée, la descente et l'atterrissage de la mission Mars 2020 Perseverance inclut une combinaison de technologies héritées des missions précédentes de la NASA sur Mars, ainsi que de nouvelles technologies innovantes. Au lieu des systèmes d'atterrissage par airbags familiers des missions précédentes sur Mars (MER et Phoenix). Mars 2020 Perseverance, tout comme pour la mission Mars Science Laboratory (MSL-Curiosity), utilisera une entrée guidée et un système d'atterrissage par grue aéroportée Skycrane pour faire atterrir le rover massif pesant plus d'une tonne (1 025 kg) en douceur sur Mars. La séquence d'atterrissage EDL dure environ 7 minutes et elle est entièrement faite de manière automatisée. Les gaz ionisés qui enveloppe le module d'atterrissage, causé par le frottement atmosphérique à grande vitesse, empêchent toute forme de communication. Lors de l'atterrissage, il fallait environ 22 minutes pour émette et recevoir un signal radio entre Mars et la Terre.

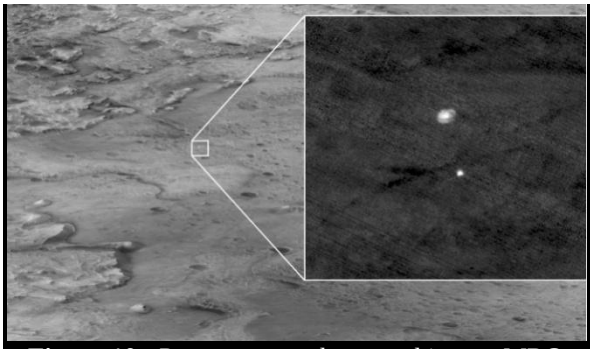


Figure 10 : Perseverance photographier par MRO (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

Quand le module d'atterrissage commence sa descendre dans l'atmosphère située à 128 kilomètres d'altitude (Figure 11), il peut rencontrer des poches d'air plus ou moins denses pouvant le faire dévier de sa trajectoire. Pour compenser, il est équipé de petits propulseurs sur sa coque arrière qui ajustent en permanence sa trajectoire et son angle d'approche. Cette technique « d'entrée guidée » aide le vaisseau spatial à rester sur la bonne voie vers sa cible. Perseverance pénètre l'atmosphère et le pique de

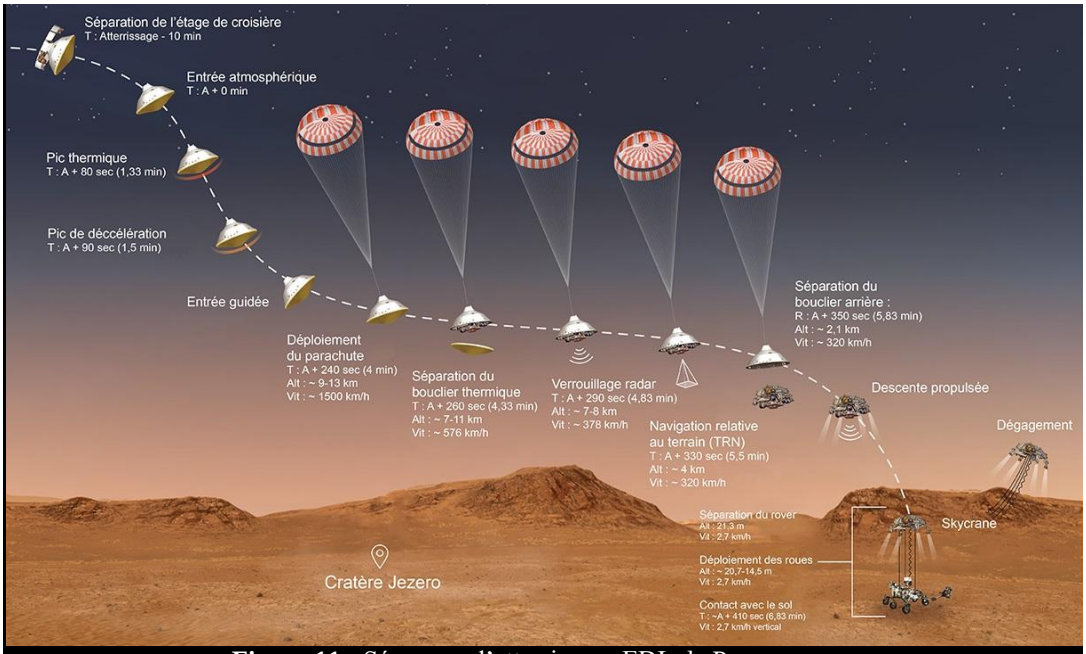


Figure 11 : Séquence d'atterrissage EDL de Perseverance
(Crédit : NASA/JPL-Caltech, adaptation française par Philippe Labrot[24])

chaleur que doit encaisser le bouclier thermique avant (Heat Shield) est atteint à 1,33 min à plus de 1 300 °C, et grâce à la friction de l'air le module freine rapidement et perdre plus de 90% de sa vitesse. L'entrée de Perseverance dans l'atmosphère est guidée par son bouclier thermique, contrôlé par l'ordinateur de bord il est utilisé comme un aileron d'un avion pour surfer dans l'atmosphère. La seconde phase est le déploiement du parachute supersonique de 21,5 mètres de diamètre quatre minutes après l'entrée atmosphérique, à une altitude de 11 km avec une vitesse de 1 512 km/h. L'orbiteur MRO qui était en position de surveillance au même moment à une distance d'environ 700 km, a réussie à prendre en image cette phase cruciale de l'atterrissage de Perseverance avec sa caméra de haute résolution HiRISE (Figure 10). Vingt secondes après le déploiement du parachute, c'est la séparation du bouclier thermique avant (Heat Shield), devenu inutile il est éjecté entre 7 et 11 km d'altitude. Cette dernière manœuvre dégage le champ de vision du radar Doppler altimétrique (fréquence entre 26,5 et 40 GHz), dont les antennes commence à sondé la surface martienne par l'analyse du temps de réflexion de ses propre émission d'onde radar, afin de déterminer son altitude et sa vitesse de descente. Le radar est verrouillé sur la surface à 4,83 min après la rentrée atmosphérique entre 7 et 8 km d'altitude, et la vitesse du module est descendue à 378 km/h.

Le système de navigation relative au terrain (LVS) est activée à 5,5 min à une altitude de 4 km, dans le but d'affiner la trajectoire et de faire la recherche d'un lieu dégagé propice à l'atterrissage, ou d'exécuter une manœuvre de détournement en cas d'urgence pour se diriger vers un terrain plus sûr. Il s'agit d'un système contrôlé par un ordinateur spécialement dédié à cette tache, qui compare en temps réel des images prises par la caméra de descente à grand angle (LCAM) avec une base de données cartographique numérisé qui modélise le terrain survolé. La carte numérisée embarquée est générée à l'aide des données de la caméra contextuelle Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) (CTX, Malin et al. 2007) et pré chargée sur le véhicule avant

[24] La séquence d'atterrissage du rover Perseverance

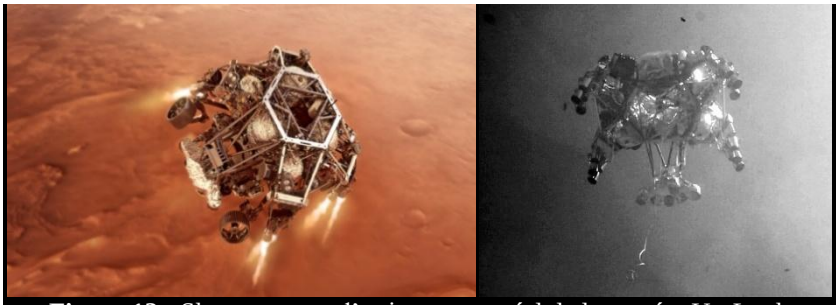


Figure 12 : Skycrane, vue d'artiste et vue réel de la caméra Up-Look (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

l'EDL. Lors de la descente, la caméra LCAM du système de navigation relative à capturé le déplacement du premier tourbillon de poussière (Dust Devils) observé par Perseverance. Le tourbillon mesurait environ 20 mètres de large à sa base, et il se déplaçait à une vitesse moyenne de 8,5 m/s à travers le relief montagneux du delta du cratère Jezero. Vient ensuite la séparation du parachute et de la coque arrière (Back Shell) par déclenchement de charges pyrotechniques à 5,83 min à une altitude de 2,1 km. La descente propulsée par quatre grappes de deux moteurs-fusées de l'étage de descente aéroportée Skycrane (grue céleste), est déclenchée pour aider au freinage et à stabilisé une descente verticale à vitesse constante (Figure 12). Environ 12 secondes avant l'atterrissage à 20 mètres au-dessus de la surface, l'étage de descente Skycrane en vol stationnaire abaisse le rover sur un ensemble de câbles de 6,4 mètres de long. Pendant ce temps, Perseverance se prépare à la séparation en déployant ses roues avec une vitesse de descente réduite à 2,7 km/h. Dès que les roues touchent le sol, l'astromobile coupe les câbles qui la relient encore au Skycrane, pour que ce dernier puisse effectuer une manœuvre de dégagement vers le haut et aller s'écraser plus loin à une distance sécuritaire.

La planète Mars disposait jadis comme la Terre, a une époque située entre 3,5 et 4,2 milliards d'années, une atmosphère plus dense avec un champ magnétique qui la protégeait du rayonnement et du vent solaire, et de beaucoup d'eau liquide qui coulait à sa surface. La vie s'est développée sur Terre à cette même époque lors de sa formation sous la forme de micro-organismes. Les missions d'explorations de surface MER (Spirit et Opportunity) ont bien démontrées que l'eau a circulé abondement à la surface de la planète via les résultats obtenues sur l'altération chimique de certains minéraux, et que les missions Phoenix et Curiosity ont également démontré que l'habitabilité était propice aux développements de la vie à une époque très ancienne. La mission de Perseverance consiste à compléter ses informations et de déterminer si Mars a subit le même processus que la Terre avant de devenir sec et aride, et par quel processus est-elle devenue ainsi.

Les neuf étapes clés d'une Campagne d'échantionnage	
1	Conduire jusqu'au lieu d'échantillonnage prévu.
2	Effectuez des observations de reconnaissance avec nos instruments et caméras scientifiques.
3	Utilisez la perceuse pour meuler le centimètre supérieur de la surface de la roche, créant une zone d'abrasion.
4	Analysez la surface de la roche fraîche à l'intérieur de la zone d'abrasion avec nos instruments scientifiques.
5	Sélectionnez une cible rocheuse à proximité pour le carottage.
6	Utilisez la perceuse pour extraire une carotte de la roche.
7	Livrez la carotte contenue à l'intérieur du tube d'échantillon dans le ventre du rover, où elle passe par une séquence complexe d'évaluation des échantillons, d'imagerie, de scellement hermétique et de stockage.
8	Conclure les observations scientifiques sur le lieu d'échantillonnage et du forage nouvellement foré.
9	Éloignez-vous de notre site d'échantillonnage, une carotte de plus.

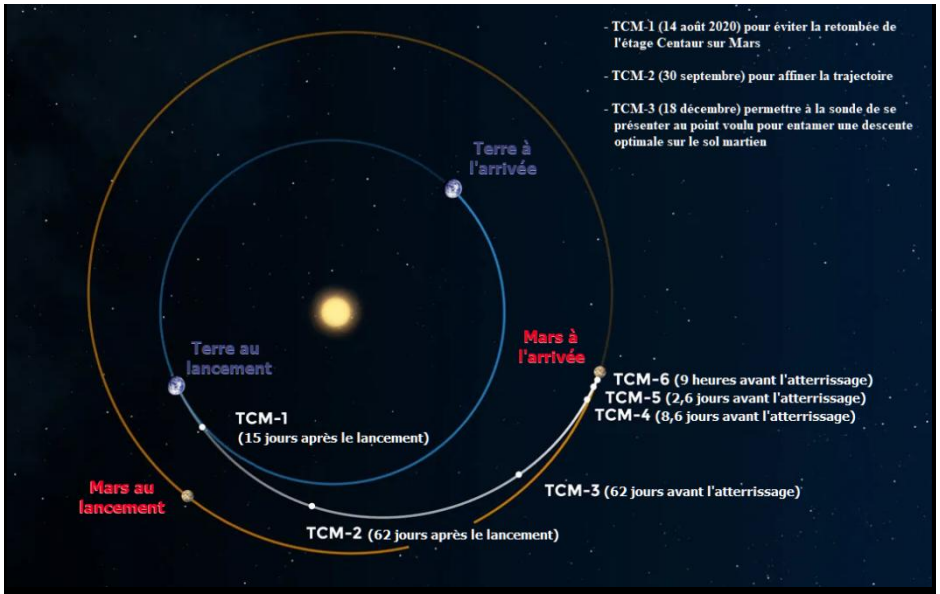


Figure 12 B : Trajectoire et manœuvres de correction de trajectoire (TCM) de Mars 2020 Perseverance faisant route vers la planète Mars (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

PERSEVERANCE ET INGENUITY (Sols 1 à 90)

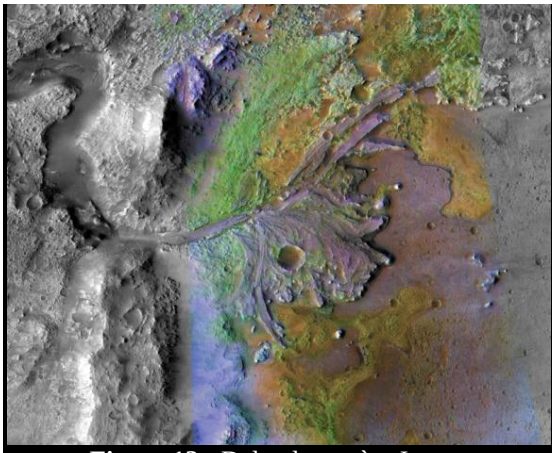


Figure 13 : Delta du cratère Jezero
(Crédit **:** NASA/JPL-Caltech/MSSS/JHUAPL)

La rover Perseverance atterri sur Mars à l'intérieur du cratère Jezero de 45 kilomètres de diamètre le 18 février 2021 à 18,44° de latitude Nord par 77,45° de longitude Est. C'est le début du printemps dans l'hémisphère Nord de la planète, avec le passage de l'équinoxe qui a eut lieu dix jours plus tôt le 8 février 2018. Le site d'atterrissage se situe entre le niveau sud-est de la région de faille de « Nili Fossae », et de la bordure nord-ouest du vaste bassin d'impacte « Isidis Planitia », un vieux cratère d'impact de 1 200 kilomètres de diamètre datant d'environ 3,9 milliards d'années. L'astromobile Perseverance se trouve à environ 3 730 kilomètres au nord-ouest du site d'atterrissage du rover Curiosity, qui est toujours en court de mission à cette époque dans le cratère Gale (Sol 3036). Perseverance s'est posé à environ trois kilomètres au sud-est de la base du delta du cratère Jezero, qui a été formé jadis par un cours d'eau qui coulait à l'intérieur en y déposant une couche de dépôt sédimentaire de plusieurs centaines de mètres de profondeur. Il y a 3,5 milliards d'années, un fleuve se jetait dans le cratère Jezero à travers « Neretva Vallis » qui abritait à l'époque un lac de plus de 40 kilomètres de diamètre et d'une centaine de mètres de profondeur. L'eau qui a coulée à différentes époques a creusé des canaux profonds et transportés des sédiments pour former l'éventail du delta dans le bassin lacustre du cratère. L'examen des données spectrales acquises depuis l'orbite (Figure 13), montre que certains de ces sédiments contiennent des minéraux composés d'argiles et de carbonates indiquant une altération chimique causée par l'eau. L'image de la figure 13 combine les informations du spectromètre imageur de reconnaissance compact pour Mars (CRISM) et la caméra contextuelle (CTX) de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) en orbite martienne depuis 2006. Le site d'atterrissage est situé près de l'équateur à une altitude de -2,55 kilomètres par rapport au niveau moyen de Mars, soit à la limite des plaines basses qui recouvre l'hémisphère Nord et des plateaux plus élevés et accidentés de l'hémisphère Sud.

Durant la première phase de la mission qui débute immédiatement après l'atterrissage (Sol 0), les équipements de l'astromobile seront déployés à tour de rôle et leur fonctionnement sera testé et vérifié. Le rover Perseverance est le cinquième astromobile de la NASA à fouler le sol martien après Sojourner de la mission Pathfinder en 1997, des rovers MER Spirit et Opportunity en 2004 et de Curiosity en 2012 (sujet traité dans le Tome 1). Perseverance va subir plusieurs semaines de tests avant de commencer son enquête scientifique de deux ans dans le cratère Jezero

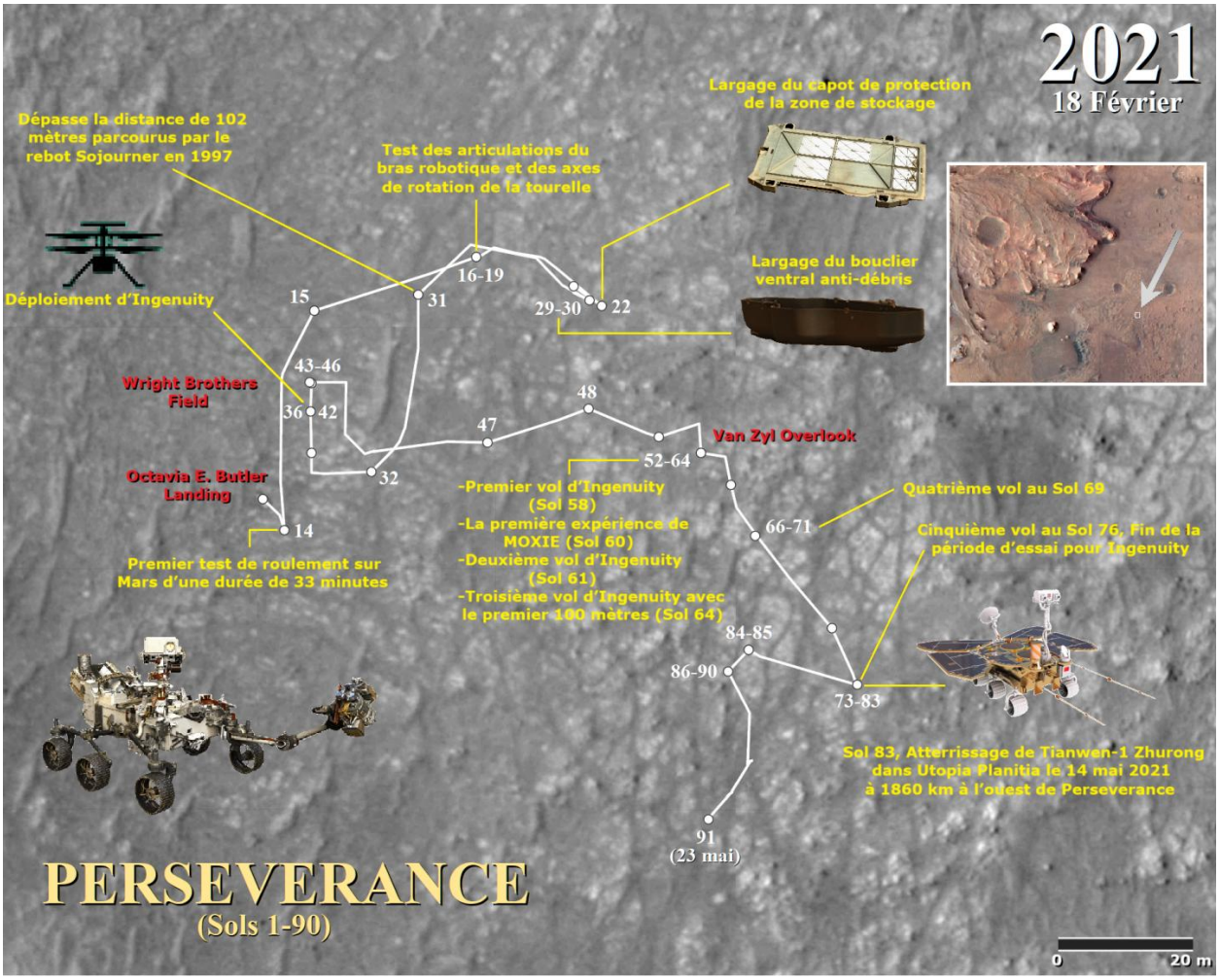


Planche 2 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero durant la mission primaire entre les Sols 1 et 90. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[25]. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

Figure 14 : Première image couleur (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

à la recherche de signes d'une vie microbienne ancienne. Une fois que la poussière soulevée lors de la phase aéroportée de l'atterrissage soit retombée sur le sol. La première image couleur haute résolution provenant du site d'atterrissage a été prise par la caméra d'évitement de danger avant gauche (Front Left HazCam), et transmises à la Terre après être relayées par plusieurs vaisseaux spatiaux en orbite autour de la planète rouge (Figure 14). Le mat et l'antenne orientable à gain élevé (bande X) sont déployés au Sol 2 (20 février), ce qui permet la transmission d'images couleur haute définition du site d'atterrissage et du pont supérieur de l'astromobile. Le premier son du vent martien est enregistré

[25] Where is Perseverance?

sur le Sol 1 environ 18 heures après l'atterrissage, alors que le mât de Perseverance était encore en position de rangement. Le son un peut étouffer a été capté par le microphone installé sous l'objectif du micro-imager laser SuperCam. Le premier panorama couleur composé de 6 images plus petites a été exécuté par les caméras de navigation (NavCams) en fin de l'après-midi vers 15h50 au Sol 2 le 20 février 2021. Après le déploiement du mât du rover, un deuxième enregistrement audio de meilleure qualité est effectué par le microphone de SuperCam sur le Sol 4. L'atmosphère de Mars étant très tenue avec une pression de seulement 6,36 mbar (600 Pa) au niveau de la surface, soit près de 170 fois moins que sur Terre, est composée essentiellement de dioxyde de carbone à plus de 96% qui se porte mal à la propagation des ondes sonores. Les sons aigus sont plus facilement atténués que les sons plus graves, qui peuvent alors parcourir des distances plus longues. Perseverance est le premier engin terrestre à pouvoir enregistrer le son du vent sur Mars. Les deux précédentes missions équipées de microphone avait échouée dans cette tentative, soit Mars Polar Lander qui s'est écrasé en 1999 dans la région polaire Sud (« Planum Australe »), et Phoenix qui s'est posé en 2008 dans la région polaire Nord (« Vastitas Borealis ») et qui n'a jamais pu être activé. Le site d'atterrissage de Perseverance à été baptisé « Octavia E. Butler Landing » en l'hommage d'une écrivaine révolutionnaire originaire de Pasadena en Californie, qui a été la première femme afro-américaine à remporter à la fois le prix Hugo et le prix Nebula, et elle a été la première écrivaine de science-fiction à recevoir une bourse MacArthur.

Au Sol 3 le 21 février 2021 vers la fin de l'après-midi à 15h52 heure locale de Mars (LMST), s'est le tour des caméras haute définition Mastcam-Z (zoom de 34-mm) à prendre leur première image panoramique couleur de 360°. Le panorama résulte d'un montage fait a partir d'une mosaïque composée de 142 images individuelles (Planche 3). L'image nous dévoile les détails d'une surface martienne qui ressemble beaucoup aux images capturées lors des précédentes missions de Spirit et de Curiosity. La vue nous montre en arrière plant pointant vers le nord-ouest les parois du cratère donnant sur le front du delta, avec une absence notable de grand champ de dunes, et derrière l'astromobile nous voyons l'empreinte laissée au sol par les rétrofusées de l'étage de descente Skycrane (jet pack). Le sol est joncé de petites et moyennes pierres dont certaines présente un aspect poreux causé soit par l'expansion des gaz, si la roche est d'origine volcanique qui se refroidit rapidement (basalte vésiculaire), ou de roche sédimentaire si les trous ont été causés par le retrait d'un fluide dissolvant un matériau soluble. Les roches meubles d'apparence vésiculaire à la surface pourraient aussi résulter d'une altération abrasive éolienne d'un régolithe (assemblage de roché brisée et de poussière), provenant d'un substrat rocheux remplis d'un minéral plus mou. Lorsque la nuit tombe, l'astromobile peut continuer à réaliser certaines opérations, mais il doit impérativement se mettre en veille durant une partie de la nuit pour recharger ses deux batteries au lithium-ion.

Une mise à jour logicielle sur les ordinateurs principaux et secondaires, pour remplacer les programmes informatiques qui ont servis lors de l'atterrissage, est transmise depuis la Terre entre les Sols 4 et 8 du 22 au 26 février 2021. Les mises à jour consistent à préparer les différents ordinateurs de bord à faire la vérification des instruments, à configurer le robot pour des trajets sur de longue distance, et à l'activation du bras robotique. Au cours des prochains jours (Sols), les cinq composants du micro-imager laser SuperCam (caméra, microphones, et les spectromètres LIBS, Raman et visible-infrarouge VISIR) seront testés avec succès. Les deux capteurs de vent de la station météorologique MEDA sont déployés au Sol 10 le 28 février, et le fonctionnement des instruments de l'imager radar pour l'expérience souterraine de Mars (RIMFAX) et de

Planche 3 : Premier panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z pris aux Sols 3 et 11. Les images du Sol 11 ont été combinées pour avoir une ligne d'horizon plus nette (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Damia Bouic)

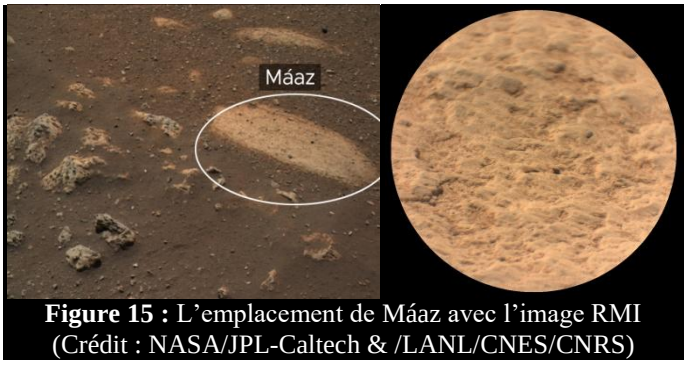


Figure 15 : L'emplacement de Máaz avec l'image RMI (Crédit : NASA/JPL-Caltech & /LANL/CNES/CNRS)

l'expérience d'utilisation des ressources in situ sur Mars Oxygen (MOXIE) sont vérifiés à leur tour avec succès. Le bras robotique est détaché et déployé pour la première fois sur le Sol 12 le 3 mars 2021, et les différentes articulations sont testés pour vérifier leurs mobilités. Les différents instruments de la tourelle vont pouvoir êtres testés à leur tour sur les prochains Sols. Le premier test de tir avec le laser infrarouge du micro-imageur laser SuperCam à également été testé sur le Sol 12, avec en prime le premier enregistrement acoustique des 30 impactes du tir laser sur la cible de roche « Máaz » (« Mars » en Navajo) situé à environ 3,1 mètres de distance (Figure 15), ainsi que la première image rapproché de la cible pris par le micro-imageur à distance RMI. Les variations d'intensité des sons fournissent des informations sur la structure physique des zones visées sur la cible, comme leur dureté relative ou la présence de revêtements altérants. L'analyse des données SuperCam montre que « Máaz » a une composition basaltique avec une quantité substantielle de magnésium et de fer, comme la première détection de la sidérite ($FeCO_3$) (carbonate de fer) presque pure.

Le 5 mars au Sol 14, l'astromobile monté sur ses six roues motrices en aluminium avec des rayons en titane, effectue son premier test de roulement sur Mars d'une durée de 33 minutes en parcourant une courte distance d'environ 4 mètres en marche avant, puis le rover fait demi-tours et poursuit le test de roulement en marche arrière sur environ 2,5 mètres. Les roues du rover ont bénéficiées de la longue expérience de Curiosity, intégrant un design un peu plus grand en diamètre et plus étroit en largeur, muni de crampons plus haut et moins espacés (48 bandes de roulement légèrement ondulées contre 24 chevrons pour Curiosity), et surtout d'un revêtement en aluminium environ deux fois plus épais que celui des roues de Curiosity pour éviter les déchirures. Durant la mission sur le sol martien, l'astromobile Perseverance devra se déplacer seul sur de courte distance pour aller rejoindre différents sites d'intérêts scientifique. Pour ce

Planche 3 : Suite du premier panorama couleur de 360° pris par Mastcam-Z aux Sols 3 et 11 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Damia Bouic)

faire, un logiciel de conduite autonome baptisé AutoNav a été développé puis installé dans l'ordinateur de bord principal du robot. Il s'agit du même logiciel qui a été installé pour la première fois sur les astromobiles MER Spirit et Opportunity, et qui a été amélioré grâce à des capacités de calcul plus poussées en passant de Curiosity à Perseverance. À la différence des rovers précédents, Perseverance est équipé d'un deuxième ordinateur agissant comme deuxième cerveau (Vision Compute Element) avec une mise à niveau majeure du logiciel de mobilité, et qui est entièrement consacré aux traitements des images. Cette possibilité de faire des traitements numériques en parallèle libère beaucoup de temps de calcule, ce qui permet a Perseverance de pouvoir se consacré à l'exécution de différentes taches. Comme par exemple de poursuivre la conduire sur le sol martien tout en interrogeant en même temps la base de données qui contient les images numérisées des caméras de navigations (NavCam) et d'évitement de danger (HazCam) par les algorithmes et l'intelligence artificielle du système de navigation AutoNav. À l'époque, le petit robot Sojourner lors de la mission Mars Pathfinder de 1997 devait s'arrêter tous les 13 centimètres pour faire le point sur son environnement, et les rovers martiens Spirit et Opportunity pouvaient parcourir une distance allant jusqu'à 0,5 mètres avant de devoir s'arrêter afin de planifier à distance depuis la Terre les prochains mouvements.

L'intelligence artificielle est composée de différents algorithmes complexes, axée sur le traitement d'images numérisée du terrain modélisées en 3D. Le traitement consiste à combiner numériquement les images prises par les deux caméras de navigation (NavCam) du mât, et des six caméras d'évitement de danger (HazCam) fixé à l'avant et à l'arrière sous le pont du rover. La numérisation des images sous forme de carte 3D donne la possibilité au rover de calculer et de pouvoir planifier une trajectoire de conduite précise sur une distance moyenne comprise entre 150 et 200 mètres par jour/Sol (contre 80 mètres pour Curiosity), tout en ayant la capacité d'identifier des petits obstacles qui se trouvent sur la route et de les contourner au besoin. Depuis le début de la mission, les différentes caméras du rover ont envoyé plus de 7 000 images à la Terre. Le deuxième déplacement de l'astromobile s'est effectué au Sol 15 sur une distance plus grande de 36,43 mètres. Sur le Sol suivant, le rover a enregistré plus de 16 minutes de sons lors de son trajet de 27,43 mètres, l'audio a été capturés par le microphone d'entrée, de descente et

Planche 4 : Panorama NavCams Sol 49 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Damia Bouic)

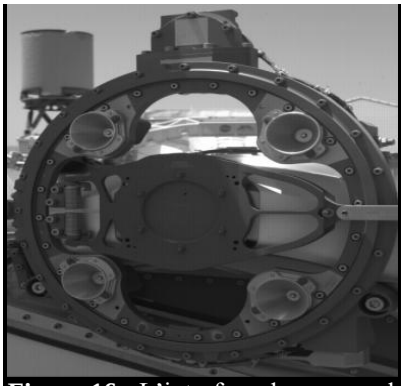
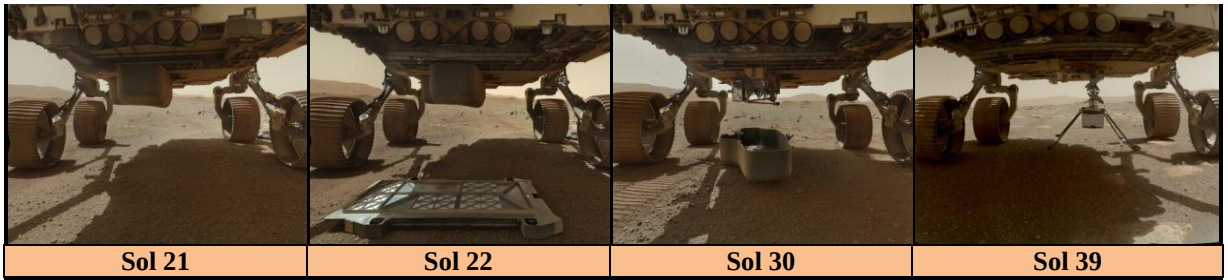


Figure 16 : L'interface du carrousel (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

d'atterrissage (EDL) fixé sur le côté droit de l'astromobile. Sur l'enregistrement on peut y entend les bruits générés par l'interaction des roues et du système de suspension de Perseverance avec la surface, ainsi qu'un bruit de grattage aigu. Le lendemain au Sol 17 le 8 mars 2021, les différentes articulations du bras robotique et les différents axes de rotation de la tourelle sont testés pour préparer le déploiement et l'utilisation des instruments SHERLOC, WATSON, PIXL et la perceuse à percussion rotative. La première image de la surface de la planète rouge prise par la caméra autofocus couleur WATSON de l'instrument SHERLOC est obtenue le lendemain en fin de journée sur le Sol 18 à 17h13. Trois jours plus tard en début de l'après-midi, la caméra WATSON est de nouveau utilisée pour vérifier l'emplacement situé sur la partie avant du châssis du rover (Figure 16), qui sert d'interface entre le bras robotique et le carrousel rotatif de forets (trépan) interchangeable du système de mise en cache, lors du transfère des échantillons récolté dans les tubes contenue à l'intérieur des forets de carottage de la perceuse. Le carrousel donne accès vers l'intérieur du robot pour faire la suite du traitement, du scellage et du stockage des tubes d'échantillonnages avant d'êtres déposés plus tard sur le sol martien.



Sol 21	Sol 22	Sol 30	Sol 39

Figure 17 : Déploiement de l'hélicoptère Ingenuity sur le sol martien (Caméra WATSON)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech & Damia Bouic pour le traitement des images sur les Sols 21, 22 et 30)

Une première mosaïque donnant sur le ventre de Perseverance est entamée par la caméra WATSON au Sol 21 le 12 mars 2021, dans le but d'amorcer la documentation sur la libération du

Planche 4 : Suite du Panorama NavCams Sol 49 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Damia Bouic)

petit hélicoptère Inginuity (Figure 17). Dans la partie supérieure de l'image, nous pouvons voir les caches de protection sur les lentilles qui protège les quatre caméras d'évitement d'obstacles avant (HazCam). Une seconde mosaïque de la caméra WATSON est prise au Sol 22 en milieu d'après-midi vers 14h15, pour documenter l'éjection du capot de protection de la zone de stockage et de livraisons des tubes d'échantillons, ce qui libère la cache pour des opérations futures de dépôts des tubes scellés sur le sol martien. Le petit bras mobile SHA (Sample Handling Assembly) du dispositif de prélèvement d'échantillons situé dans le ventre de l'astromobile, possède désormais toute l'espace nécessaire pour effectuer les premiers tests sur la manipulation des tubes d'échantillons. Une troisième mosaïque de la caméra WATSON est effectuée en milieu de l'après-midi à 14h52 au Sol 30 le 21 mars 2021, cette fois-ci c'est pour documenter le largage du bouclier ventral anti-débris qui a servit de protection pour l'hélicoptère Inginuity (1,8 kilogramme) lors de l'atterrissage. L'astromobile reprend la route au Sol 31 en se dirigeant vers l'est, puis en tournant vers le sud pour aller rejoindre le site baptisé « Wright Brothers Field » et de débuter les premiers tests d'envole d'Inginuity. Le site a été nommé en l'honneur des frères Wright pour marquer le 117^{iem} anniversaire de l'histoire de l'aviation et du premier vol sur Terre. Le premier 100 mètres parcourus à la surface de la planète Mars à lieu dès le départ du Sol 31 le 22 mars 2021, battant ainsi l'ancien record de 102 mètres parcourus par le petit rebot Sojourner lors de la mission de Mars Pathfinder en 1997.

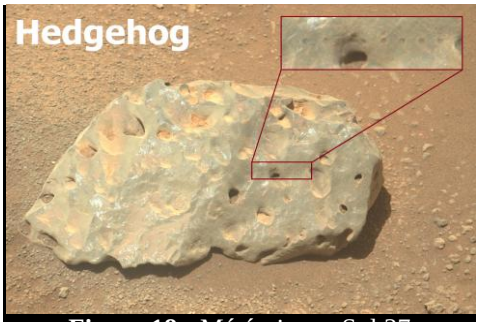


Figure 18 : Météorite au Sol 37
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

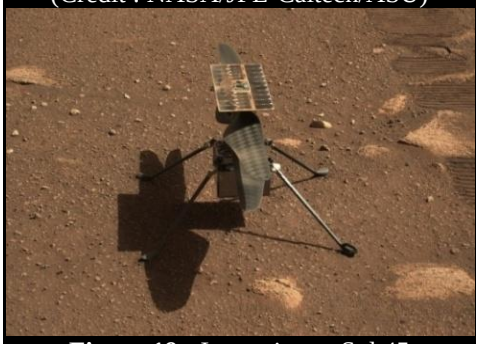


Figure 19 : Ingenuity au Sol 45
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Le déploiement de l'hélicoptère Inginuity à la surface martienne s'effectue durant une semaine entière entre les Sols 36 et 43 du 26 mars au 3 avril 2021. Chaque étape est documentée et photographié par la caméra WATSON de l'instrument SHERLOC fixé sur la tourelle au bout

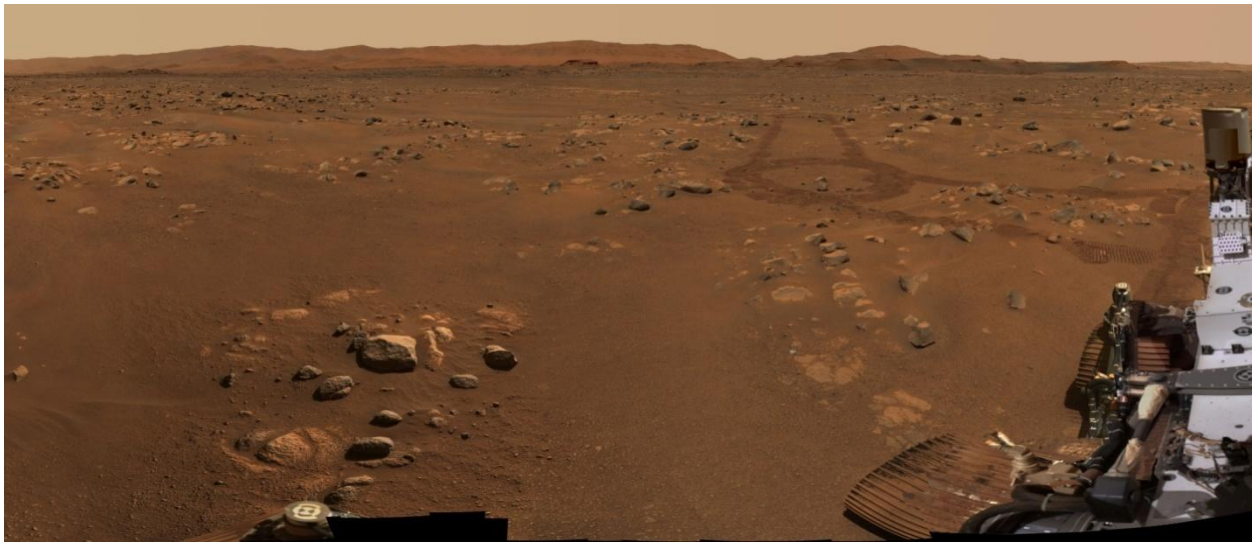


Planche 5 : Panorama « Van Zyl Overlook » de 360° pris à l'aide de la caméra Mastcam-Z entre les Sols 53-64 (14-26 avril 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell et Jonathan Joseph)

Figure 20 : Selfie Perseverance et Ingenuity (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

du bras robotique. La séquence débute par la libération du verrou de lancement au Sol 36, suivit du redressement en position verticale entre les Sols 37 et 38, de l'abaissement des deux pattes en composite de carbone du côté droit au Sol 39. Durant le déploiement d'Ingenuity sur le Sol 37, l'astromobile a photographié avec la caméra Mastcam-Z de gauche sa première météorite de Fer/Nickel rencontrée sur le sol martien de 15 centimètres de long dénommé « Hedgehog ». Le robot étudie la météorite avec différents instruments, incluant un alignement de plusieurs tirs laser de SuperCam sur la roche dans le cadre d'une expérience LIBS, afin de déterminer la composition chimique (atomique et moléculaire) de la météorite (Figure 18). Mais avant la libération complète de l'hélicoptère, Perseverance est utilisé comme source d'énergie pour charger les six cellules de la batterie lithium-ion d'Ingenuity. Le petit hélicoptère Inginuity est finalement décroché du ventre de Perseverance, et touche pour la première fois la surface martienne le 3 avril 2021 (Sol 43). Un rapport de la station MEDA pour les Sols 43 et 44 (3 et 4 avril), montre une lecture de -22 °C pour la température la plus élevée durant le jour, et de -83 °C pout la température la plus basse durant la nuit dans le cratère Jezero, avec des rafales de vent filant à plus de 10 mètres par seconde. La station MEDA peut enregistrer la température à trois hauteurs différentes grâce à des capteurs installés sur le corps et le mât du rover (0,84 mètres, 1,45 mètres et 30 mètres). En plus de la température de surface, le système utilise un capteur infrarouge capable de mesurer la température à près de 30 mètres au-dessus du rover.

L'astromobile s'éloigne ensuite de quatre mètres pour permettre à Inginuity d'effectué ses premiers tests de rotation des giravions (aéronef dont la sustentation est assuré par des voilures tournantes), et de recharger ses batteries grâce à l'énergie solaire captée par son petit panneau solaire fixé à son sommet. Mais avant de faire les premiers essais de vol aérien d'Inginuity,

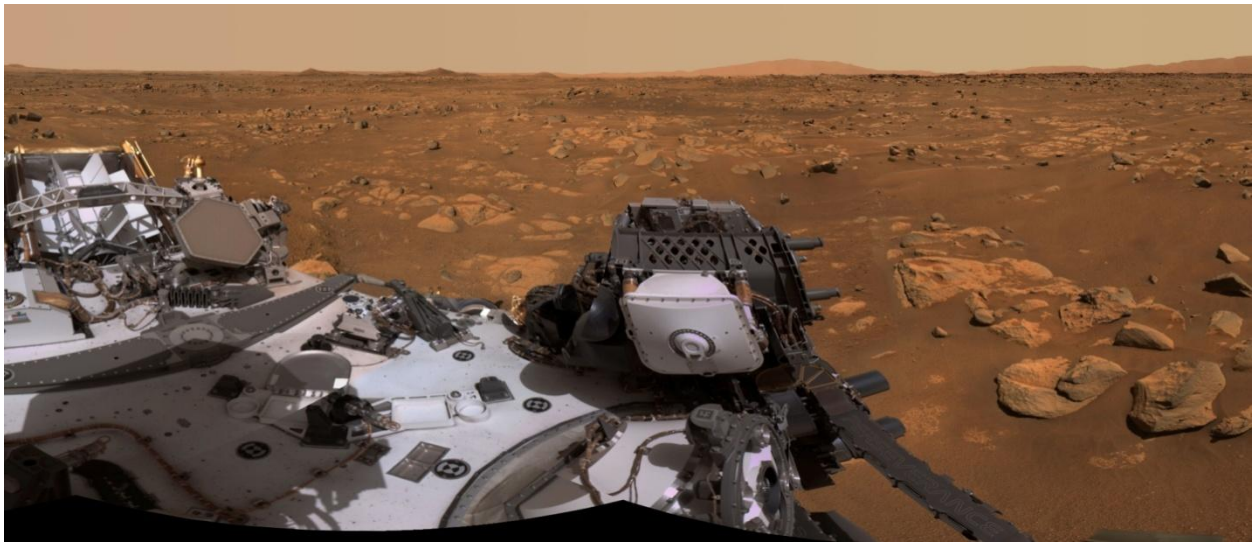


Planche 5 : Suite du Panorama « Van Zyl Overlook » de 360° pris à l'aide de la caméra Mastcam-Z entre les Sols 53-64 (14-26 avril 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell et Jonathan Joseph)

l'astromobile doit aller rejoindre un espace de sécurité et d'observation baptisé « Van Zyl Overlook », qui se trouve à une soixantaine de mètres vers l'ouest (Figure 19). L'astromobile prend un selfie avec Ingenuity qui se trouve derrière à 3,9 mètres de distance à l'aide de la caméra à grand angle WATSON. La vue est composée d'une mosaïque de 62 images pris au Sol 46 le 6 avril 2021 (Figure 20). Après avoir effectué deux séances de roulements sur le sol martien, l'hélicoptère Ingenuity qui est toujours garé dans son espace d'essai de vol aérien, reçois la commande qui lui est retransmise par le rover Perseverance d'effectué un test de rotation lente de ses pales au Sol 48 le 8 avril 2021. Le lendemain, l'astromobile s'arrête durant quelques jours le temps d'étudier les environs, et amorce en fin de journée un nouveau panorama couleur composé de cinq images pris avec les caméras de navigations NavCams au Sol 49 à 15h50 (Planche 4).

L'astromobile reprend la route au Sol 52 et parcours une courte distance de 11,55 mètres, avant de rejoindre l'espace de stationnement sur lequel il restera presque immobile durant les douze prochains jours entre les Sols 52 et 64 du 13 au 25 avril 2021, le temps d'observé le petit hélicoptère Ingenuity effectué ses premiers tests de vols dans le ciel martien, ainsi que faire l'observation de l'évolution de plusieurs tourbillons de poussières (Dust Devils) en ce début de printemps martienne (Figure 28). Durant se temps, les caméras stéréos Mastcam-Z fixé sur le mât de Perseverance capture le panorama « Van Zyl Overlook » de 360° (Planche 5). Le panorama a été nommé en hommage du regretté directeur de l'exploration du système solaire de la NASA et du JPL, Jakob J. Van Zyl, qui a rejoint le JPL en 1986 et qui a joué un rôle majeur dans la promotion et le développement de nombreuses missions robotiques du système solaire. Le panorama de 2,4 milliards de pixels est composé de l'assemblage d'une mosaïque de 992 images Mastcam-Z plus petites, prises par la caméra de l'œil droit avec le téléobjectif zoom réglé au maximum (110 mm). La version du panorama utilisé ici, comprend l'ajout du pont du rover qui a été vu par les caméras de navigation le 20 mars 2021 (Sol 29). Le panorama s'étend sur environ 180 degrés, et les extrémités gauche et droite de la vue correspondent approximativement à la région plein sud. La vue couvre la zone Est du front du delta situé dans la région ouest derrière le rover visible dans la partie droite de l'image de gauche, et au loin vers le centre de l'image nous

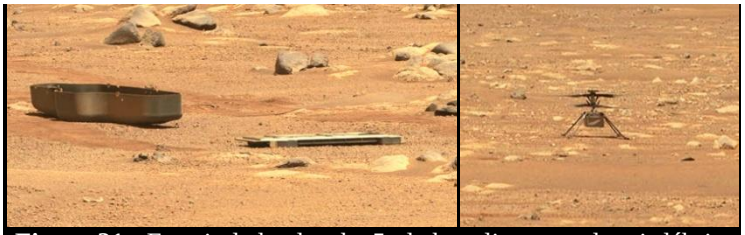


Figure 21 : Extrait de la planche 5 : le bouclier ventral anti-débris, le capot de protection de la zone de stockage, et à droite Inginuty (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell)

retrouvons le sommet de la colline « Kodiak » de quelques dizaines de mètres de haut sur près de 250 mètres de large. Avec un plus fort agrandissement de l'image de gauche, centré de chaque côté des traces de roues de forme circulaire de Perseverance, nous retrouvons à droite le bouclier ventral anti-débris et le capot de protection de la zone de stockage étendue sur le sol martien. À gauche des traces de roues (en bas et à droite de « Kodiak »), nous avons Inginuity déposé sur le sol qui attend patiemment son heure de gloire (Figure 21). Dans l'image de droite du panorama situé sur la ligne d'horizon juste au-dessus de l'astromobile, nous retrouvons trois petits pics montagneux, il s'agit en partant de la gauche vers la droite de « Isle Royale », « Santa Cruz » et de « Mana Kahalawai ».

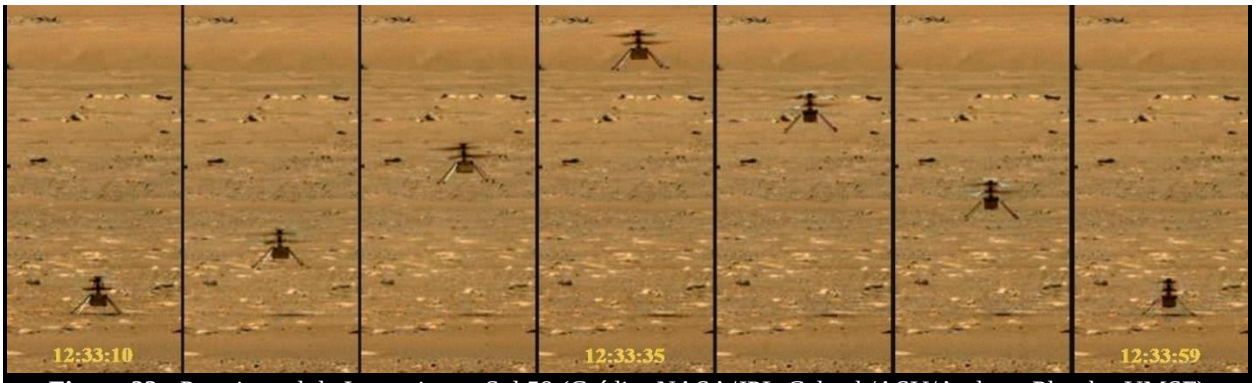


Figure 22 : Premier vol de Ingenuity au Sol 58 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/Andreas Plesch - UMSF)

Les températures nocturnes au cratère Jezero peuvent descendre jusqu'à -90 °C, ce qui peut geler ou fissurer les composants électriques non protégés, ou encore endommager les batteries embarquées nécessaires au vol du petit hélicoptère Ingenuity. Survivre à cet environnement hostile est toute un exploit pour un petit robot volant. La seule mission initiale d'Ingenuity est d'effectuer cinq tests de vol dans la fine atmosphère de la planète Mars durant 30 jours. Le but est d'accumuler le plus d'informations possible sur les réelles capacités de faire des voles dans l'atmosphère raréfier de Mars, dont l'objectif principale est de préparer une éventuelle mission de récupération d'échantillons qui utilisera des hélicoptères. Le rover sert de relais de communication pouvant couvrir une distance d'un kilomètre via une liaison UHF (900 MHz) entre Ingenuity et la Terre. Durant les vols, le flux de données sera envoyé en temps réel de l'hélicoptère au rover pour être stocké et retransmis ultérieurement sur Terre.

Après avoir mis à jours le logiciel de contrôle de vol d'Inginuity, pour résoudre le problème rencontré lors de l'essai à grande vitesse des rotors de l'hélicoptère prévu au Sol 49. Le premier vol inaugural propulsé et contrôlé dans l'atmosphère d'une autre planète sera effectué par le petit l'hélicoptère Inginuity, lors de son premier vol d'essai exécuté au début de l'après-midi entre 12h33 et 12h34 sur le Sol 58 le 19 avril 2021 (Figure 22). Ingenuity commence par faire tourner les quatre pales en fibre de carbone (deux par rotor) à grande vitesse jusqu'à 2 537 tour/min (testé précédemment sur le Sol 56), et après avoir effectuées la liste des auto-

vérifications, Inginuity reçois le feu vert pour son premier envole. Le premier vol consiste à faire une petite montée verticale de 3 mètres, suivit d'un vol stationnaire stable d'une durée d'environ 30 secondes, et de redescendre pour se posé à nouveau en douceur à la surface de la planète Mars, pour une durée totale de vol de 39,1 secondes. Le tout surveillé par les imageurs NavCams et Mastcam-Z de Perseverance, et par les deux caméras à bord d'Ingenuity située sur l'un des bords inférieurs du fuselage avant; soit une caméra couleur haute résolution orienté vers l'horizon et une caméra de navigation noir et blanc de plus faible résolution pointé vers le bas pour la détermination de la position et de l'attitude. Avec se premier vol réussi en planant au-dessus du cratère Jezero, le petit giravion Ingenuity est entré dans l'histoire en démontrant qu'un vol propulsé et contrôlé sur une autre planète était possible.

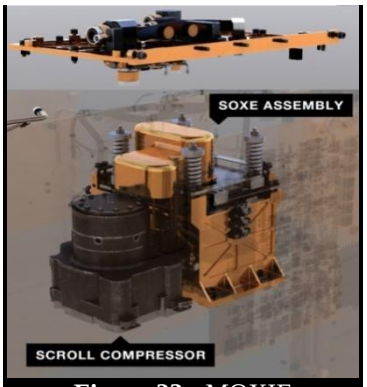


Figure 23 : MOXIE
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

La première expérience de conversion d'une partie de la fine atmosphère riche en dioxyde de carbone de la planète rouge en oxygène par l'instrument MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment) a lieu le 20 avril au Sol 59 (Figure 23). Après une heure de fonctionnement, MOXIE a produit environ 5,4 grammes d'oxygène, soit suffisamment pour maintenir un astronaute en vie durant environ 10 minutes. Le processus de conversion nécessite des niveaux de chaleur élevés pouvant atteindre une température d'environ 800 Celsius, par conséquence l'instrument est fabriqué avec des matériaux très résistants à la chaleur. La conversion et le stockage de l'oxygène sur Mars pourra aider à la propulsion de fusées, lors d'une prochaine mission qui serait axée sur la récupération des tubes d'échantillonnages laissés sur le sol martien par Perseverance. De telles expériences de convertisseur d'oxygène pourraient également fournir de l'air respirable aux futurs astronautes venus explorer Mars. L'expérience MOXIE est programmée pour être reconduite à neuf autres reprises durant la première année martienne (près de 2 années terrestre). Les cycles de production d'oxygène se dérouleront en trois phases. La première phase est pour vérifier le fonctionnement de l'instrument, tandis que la deuxième phase fera fonctionner l'instrument dans diverses conditions atmosphériques, telles que différentes heures de la journée et différentes saisons. La troisième phase essayera de nouveaux modes de fonctionnement pour y inclure des analyses comparatives faites à des températures différentes.

Le deuxième vol d'Ingenuity est effectué avec succès le lendemain au début de l'après-midi à 12h33 au Sol 61 le 22 avril 2021. D'une durée de vol plus longue de 51,9 secondes avec une altitude maximale plus élevée à 5 mètres, incluant un vol stationnaire et des mouvements latéraux sur 4 mètres (2 mètres en allé et 2 mètres pour le retour) à une vitesse moyenne de 0,5 m/s. Le troisième vol inaugural d'Ingenuity est effectué avec succès au Sol 64 le 25 avril 2021.

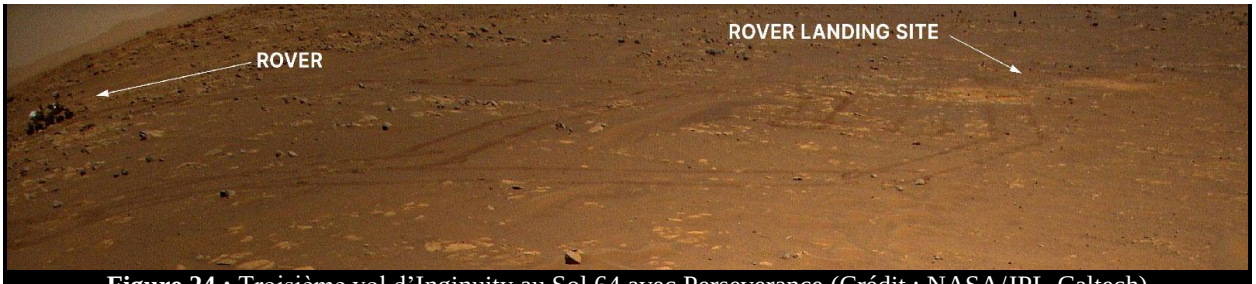


Figure 24 : Troisième vol d'Inginuity au Sol 64 avec Perseverance (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

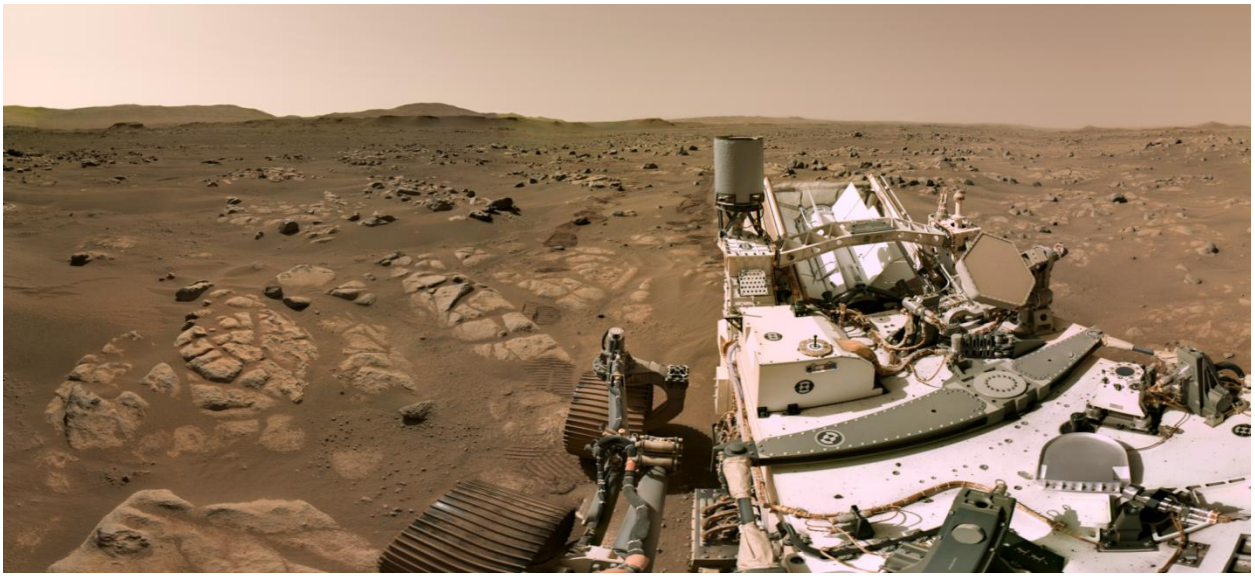


Planche 6 **:** Panorama composé d'une mosaïque de 5 images pris par la caméra NavCam de gauche au Sol 66 (27 avril 2021) à 15h00 heure locale martienne. (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Figure 24 B : Troisième vol (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'hélicoptère situé à environ 85 mètres du rover, a établit de nouveau record en volant durant 80,3 secondes sur une altitude de 5 mètres, et a franchit pour la première fois une grande distance avec un parcours de 100 mètres (moitié en allé et moitié pour le retour) et atteignant une vitesse de pointe de 2 mètres par seconde. La caméra couleur de l'hélicoptère a pris en photo le rover Perseverance, qui est visible dans le coin supérieur gauche de la figure 24, et en gros plan sur la figure 24 B. L'ordinateur de vol d'Ingenuity, qui pilote l'engin de manière autonome en fonction des instructions envoyées de la Terre via le relais de Perseerance, a démontré lors du pilotage automatique la performance des algorithmes de vol de la caméra de navigation, qui suit les caractéristiques de la surface pour s'orienter. Le test de démonstration de l'hélicoptère Ingenuity étant terminé, ayant atteint ses objectifs de mission et démontré la faisabilité d'explorer Mars en mode aérien. Les trois prochains vols seront effectués pour explorer les capacités de l'hélicoptère à manœuvrer dans une atmosphère raréfiée, et les vols suivant seront utilisé dans un cadre plus opérationnelle pour faire de la reconnaissance de terrain pouvant servir à l'astromobile dans la recherche de site et de cible d'intérêt géologique. Après une longue pause sur le site « Van Zyl Overlook », l'astromobile amorce la deuxième phase de sa mission sur Mars dont l'objectif principale consiste à faire la recherche de signe fossilisé de vie microbienne ancienne, et reprend la route vers le sud au Sol 65 le 26 avril 2021.

Perseverance s'arrête de nouveau pour cinq jours entre les Sols 66 et 72 du 27 avril au 2 mai 2021 devant un ensemble d'affleurement rocheux, afin de commencer la campagne de recherche d'échantillon. Sur le Sol 66 en milieu d'après-midi à 15h00 heure locale martienne, la caméra NavCam de gauche du rover exécute une nouvelle mosaïque pour immortalisé le paysage martien composée de cinq images (Planche 6). Un quatrième vol d'Ingenuity est exécuté sur le Sol 69 le 30 avril 2021, d'une durée de 116,9 secondes avec un parcours encore plus grande de 266 mètres aller-retour pour une vitesse moyenne de 3,5 m/s. L'astromobile à l'aide du

Planche 6 **:** Suite du panorama pris au Sol 66 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Figure 25 : NavCam-L Sol 72 à 16h05 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

Figure 26 : NavCam-L Sol 73 à 14h40, après avoir parcourus 9,84 m (Crédit : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

microphone du micro-imager laser SuperCam, a pour la première fois enregistrer un audio le bruit vrombissants des rotors de l'hélicoptère lors du quatrième vol d'Ingenuity. Il s'agit d'un son étouffé par la mince atmosphère martienne et obscurci par des rafales de vent effectué à plus de 80 mètres de distance. L'astromobile reprend la route en direction sud-est au Sol 72 (Figure 25) pour rejoindre un nouveau site d'intérêt, puis s'arrête de nouveau sur le Sol suivant pour une durée de dix jours entre les Sols 73 et 83 du 4 au 14 mai 2021 (Figure 26). Le cinquième vol d'Ingenity a eu lieu trois jours plus tard sur le Sol 76 le 7 mai en début de l'après-midi à 12h33, pour profiter des rayons du soleil afin de recharger ses batteries à l'aide de son unique panneau solaire. Le panneau solaire fourni une production d'énergie suffisante dans la recharge des batteries pour un vol quotidien de 90 secondes. L'hélicoptère quitte définitivement l'aérodrome

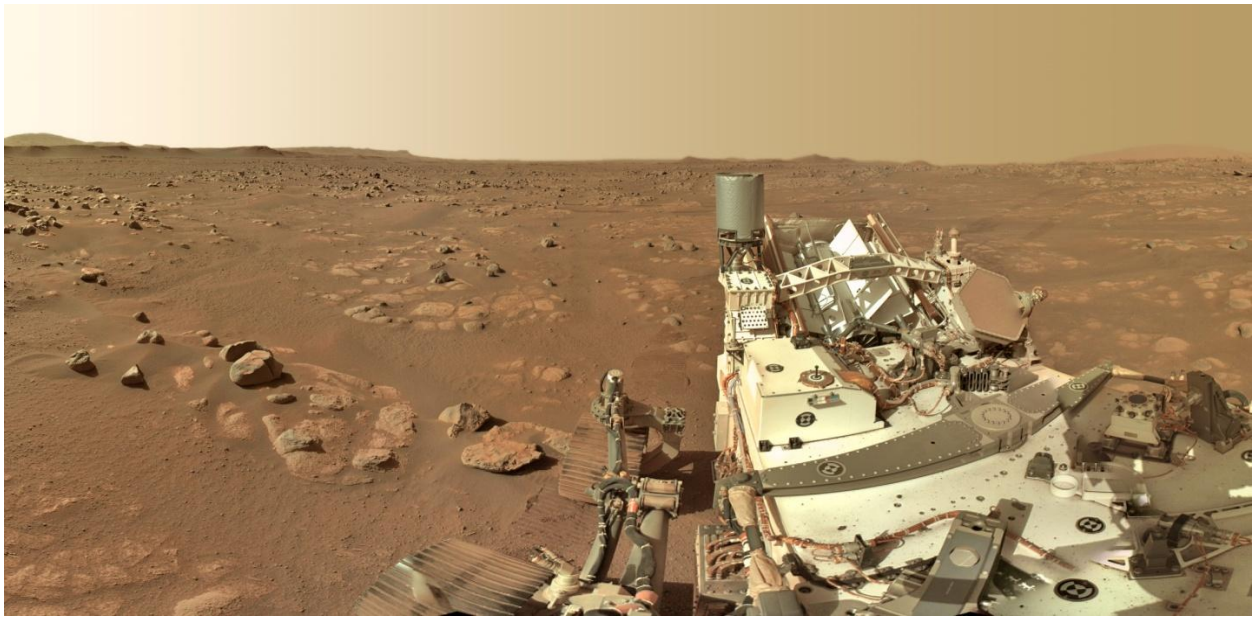


Planche 7 **:** Panorama de 360° composé d'une mosaïque assemblée prise par la caméra NavCam de gauche au Sol 86 (16 mai 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

Figure 27 : Sol 84 à 14h33, après un parcours de 18,33 m (Crédit : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

« Wright Brothers Field » en parcourant en aller simple une distance de 129 mètres sur une altitude moyenne de 10 mètres, le tout effectué en 108,2 secondes à une vitesse moyenne de 2 m/s, pour se dirigé vers un nouveau aérodrome qui se trouve plus au sud (voir l'annexe pour plus de détail). Le vol représente la transition avec la phase de démonstration opérationnelle, qui consiste désormais à jouer le rôle d'éclaireur pour faire le repérage et des observations d'imagerie stéréo aériennes de zones non accessibles par le rover, qui continu a jouer son rôle de station de base pour relayer les communications entre l'hélicoptère Ingenuity et la Terre.

La deuxième expérience de MOXIE à eu lieu sur le Sol 81. Le Sol 82 le 14 mai 2021 est une journée très importante dans l'exploration spatiale de la planète Mars. Il s'agit de l'atterrissage réussi de la mission chinoise Tianwen-1 Zhurong dans la région de « Utopia Planitia » situé à plus de 1 860 km à l'ouest du site d'atterrissage du rover Perseverance. Et pour la première fois à la surface de Mars, il y a trois astromobile (Curiosity, Perseverance et Zhurong) et un atterrisseur (Phoenix) qui son opérationnelle et en activité en même temps sur la planète rouge. Après dix jours d'arrêt, le robot reprend la route vers l'ouest au Sol 84 le 15 mai 2021, et entame un nouveau panorama couleur de 360° du paysage martien avec ses caméras de navigation NavCams (Figure 27). La route vers le sud reprend deux jours plus tard au Sol 86 sur une très courte distance, et aussitôt arrivé sur les lieux le rover prend un nouveau

Planche 7 **:** Suite du panorama de 360° composé d'une mosaïque assemblée prise par la caméra NavCam de gauche au Sol 86 (16 mai 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

panorama couleur avec ses caméras de navigation NavCams (Planche 7), qui nous fait découvrir le magnifique paysage martien qui englobe l'astromobile. Nous pouvons voir sur le panorama couleur de 360° de la planche 7, l'origine du dernier parcours de 4,78 mètres effectué au Sol 86 et qui est situé juste derrière l'astromobile. La région ouest se trouve à chaque extrémité de l'image, ou nous retrouvons à gauche de l'image de gauche du panorama la zone Est du front du delta. Vers le centre de l'image de gauche situé derrière le rover sur la ligne d'horizon, qui correspond approximativement à la vue portant sur la région nord-est et Est du cratère. Nous retrouvons les trois petits pics montagneux, qui sont en partant de la gauche vers droite : « Isle Royale », « Santa Cruz » et « Mana Kahalawai ». La colline « Kodiak » est visible dans la partie droite de l'image de droite du panorama, et loin derrière nous retrouvons le flanc intérieur de la crête ouest du cratère Jezero d'une hauteur de 700 mètres.

Il s'agit du dernier arrêt dans les environs du site d'atterrissage « Octavia E. Butler Landing » d'une durée de quatre jours entre les Sols 86 et 90 du 18 au 22 mai 2021. Le but est de finir de préparer Perseverance avant d'entreprendre la grande randonnée vers le sud pour rejoindre de nouveaux sites d'intérêts géologiques et scientifiques, et de débuter les campagnes de carottages et de collectes d'échantillons. La prochaine étape de la mission est de se rapprocher de l'unité géologique dénommée formation « Séítah » riche en olivine, qui signifie « au milieu du sable » en langue Navajo. Il s'agit de l'unité géologique la plus ancienne qui recouvre le fond fracturé du cratère appelé formation « Máaz » (Sols 1-201, Sols 342-416), qui est le nom navajo de Mars. L'unité est composée de substrat rocheux, de crêtes et des dunes de sable, il s'agit des couches de substrat rocheux les plus profondes et les plus anciennes du cratère « Jezero », composées principalement des minéraux pyroxènes et plagioclase. Séítah (Sols 202-342, Sols 416-420) s'est formé par sédimentation de cristaux d'olivine dans un corps magmatique basaltique, tel qu'une coulée de lave épaisse, un lac de lave ou un filon-couche. Le magma s'est ensuite refroidi et a subi différentes épisodes d'érosion avant la mise en place des coulées de lave de Máaz recouvrant les roches de Séítah.

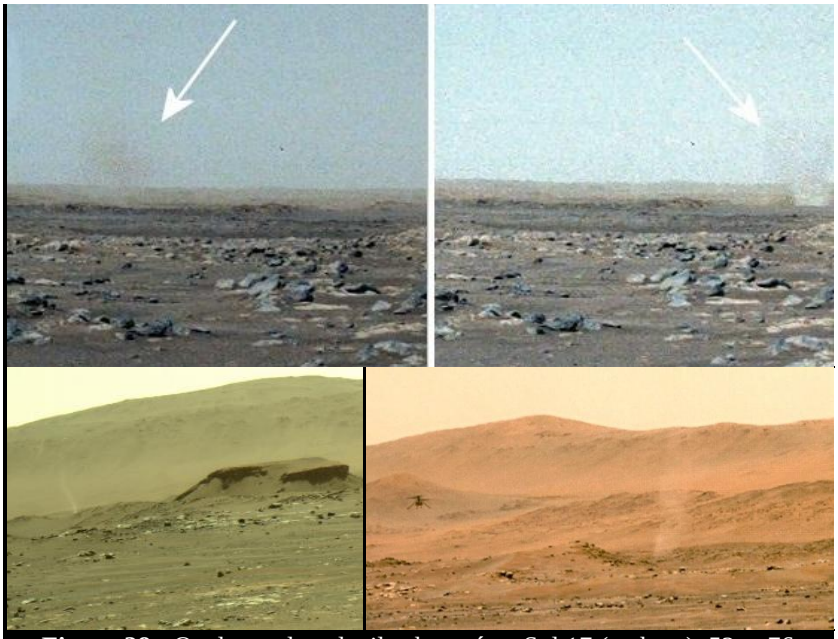


Figure 28 : Quelques dust devils observé au Sol 17 (en haut), 52 et 76 (Crédit : NASA)

Les étapes de validation pour la sélection des cibles d'études et d'analyses : Une fois une cible d'échantillonnage est identifiée, chaque échantillon est documenté par un ensemble standardisé d'activités et d'observations. Ces activités constituent le protocole d'observation standardisé qui comprend des images prises à plusieurs échelles et résolutions de la cible, ainsi que des analyses chimiques et minéralogiques de la surface (« science de proximité ») effectués par les instruments scientifique de la tourelle (SHERLOC-Analyse des environnements habitables par Raman et luminescence pour les composés organiques et chimiques, et PIXL-instrument planétaire pour la lithochimie des rayons X permettant de déterminer la composition élémentaire des matériaux). Si les résultats des analyses le permettent, une cible d'abrasion d'environ 1 cm de profondeur et 5 cm de diamètre est acquise à quelques dizaines de centimètres de la cible d'échantillonnage (carotage/forage), au sein de la même lithologie ou couche sédimentaire afin de fournir une surface rocheuse fraîche pour la science de proximité. Dans cette zone d'abrasion des images haute résolution (Mastcam-Z et WATSON) sont utilisé avec des images contextuelles combinées à des mesures spectrales (SHERLOC et PIXL) pour aider à obtenir la composition chimique, minéralogie et organique. Les mesures spectrales sont combinées à des images contextuelles haute résolution soit via la caméra Autofocus Context Imager (ACI) de SHERLOC, qui capture des images de la zone étudiée pour fournir un contexte aux données obtenues par la spectrométrie Raman ultraviolet de SHERLOC qui sert à identifier les matériaux chimique et organique. La courbure des lentilles de la caméra ACI permet également de focaliser le laser sur les cibles. Il y a aussi la caméra Micro Context Camera (ACC) de PIXL, qui prend des images de la zone étudiée dans l'objectif de fournir un contexte aux données obtenues grace au scan et aux données obptenues par la spectrométrie de fluorescence X servant à identifier la minéralogie. Après le carottage, une image de l'échantillon dans le tube est prise par la caméra CacheCam, la quantité d'échantillon est ensuite estimée et le tube est scellé hermétiquement. Des numéros de série uniques sont facilement visibles sur l'extérieur du tube et du joint afin de garantir une identification sans ambiguïté, même des décennies après l'acquisition.

CAMPAGNE SUD ARTUBY RIDGE (Sols 91 à 379)

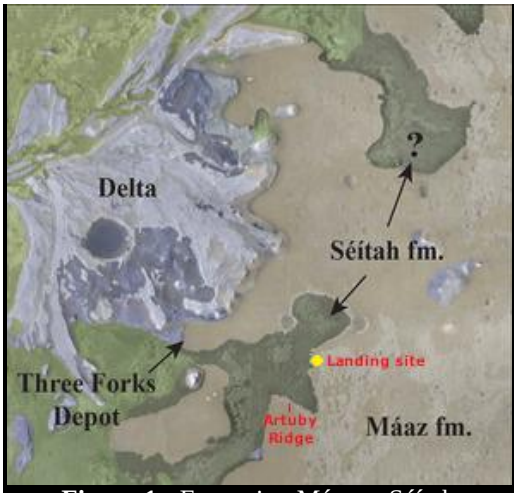


Figure 1 : Formation Máaz et Séítah (Crédit **:** NASA/JPL-Caltech)

L'aventure continue de plus belle au Sol 91 le 23 mai 2021, et après que l'astromobile est effectué un court déplacement d'environ 14 mètres. L'hélicoptère Ingenuity exécute son sixième vol en franchissant une distance allé simple de 215 mètres vers le sud-ouest. Ingenuiy devance ainsi l'astromobile sur son trajet pour agir comme éclaireur, permettant de sécurisé la route de Perseverance dans ses déplacements sur le sol martien. Et vers la fin de l'après-midi à 15h57, l'astromobile entame une nouvelle image panoramique couleur de 360° avec sa caméra de navigation NavCam de gauche qui dévoile le magnifique paysage des lieux (Planche 2). Nous retrouvons au loin dans les parties gauche et droite de l'image, le front sud-est du Delta du cratère Jezero ainsi que Kodiak. Le rover qui a déjà parcourus une distance de plus de 350 mères depuis le départ du site d'atterrissage, amorce désormais sa véritable mission géologique et scientifique (Crater Floor Campaign), qui consiste à rechercher et à faire la collecte d'échantillons qui devront être préparé pour être rapportés sur Terre par une mission ultérieure. Pour ce faire, l'astromobile devra explorer la surface martienne sur une plus grande surface de manière autonome à partir d'instruction de base fourni depuis la Terre. Le logiciel de conduite autonome AutoNav utilise des cartes 3D du terrain, construites à partir du traitement numérique d'images panchromatiques (noir & blanc) prise par les différentes caméras de navigation (NavCams et HazCams), qui permet au robot de pouvoir s'orienté et d'être capable de planifier des itinéraires de conduite et de déplacement sur de longue distance. Perseverance capture périodiquement des images au fur et à mesure de son déplacement, tout en comparant une position à la suivante pour voir si la distance parcouru correspond bien à la distance attendue contenue dans sa mémoire. Le rover peut identifie les dangers le long d'un trajet et de planifie ensuite un itinéraire pour contourner les obstacles, le tout est effectué sans instruction supplémentaire provenant de la part des contrôleurs restés sur Terre, avec une vitesse de pointe de 120 mètres par heure. L'objectif du nouveau logiciel AutoNav est d'améliorer la traction sur le terrain et la durabilité pour une endurance de conduite de plus longue durée. L'astromobile enregistre la distance parcourue d'un endroit à un autre à l'aide d'un système appelé « odométrie visuelle » qui a été testée au Sol 72.

Pour mener à bien les expériences d'échantillonnages qui peuvent s'échelonné sur plusieurs jours, l'astromobile est équipé d'une perceuse à percussion rotative munie d'une suite

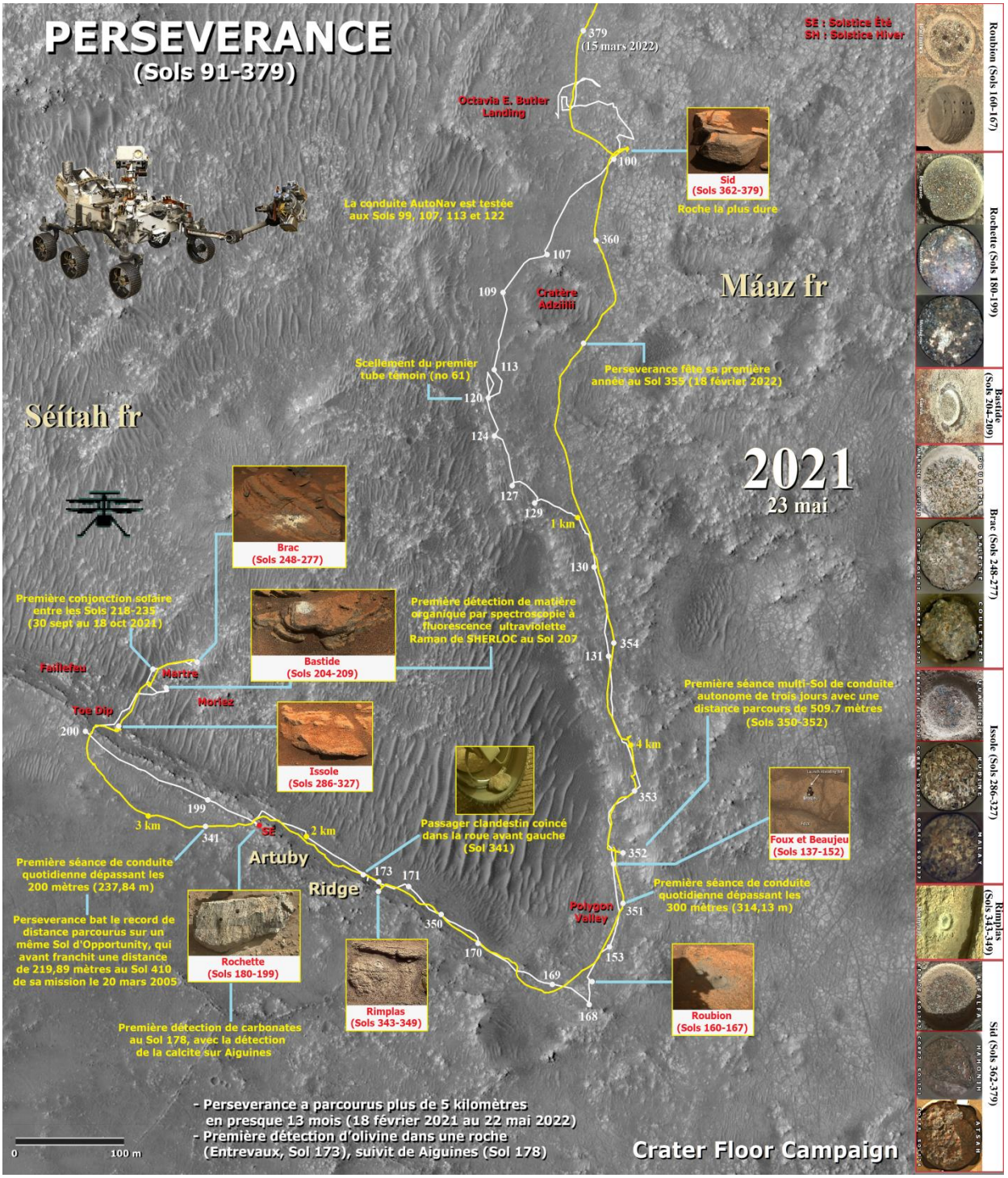


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 91 et 379 du 23 mai 2021 au 15 mars 2022. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[26] et de Phil Stooke[27] pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

[26] Where is Perseverance?
[27] Perseverance Route Map Archive du Forum UMSF

de différents types de forets interchangeables contenus dans un carrousel rotatif. Dans un premier temps un foret est utilisé pour abraser et meuler la surface d'une cible de roche, révélant ainsi sa structure et sa composition internes. Le nettoyage par jets de gaz du gDRT est ensuite utilisé pour éliminer la poussière résiduelle de la surface abrasée, ce qui permet à différents instruments de la tourelle d'être déployés sur une surface plane et propre pour effectuer des enquêtes plus approfondies. Différents instruments sont par la suite déployés sur la cible pour imager et cartographier la chimie et la minéralogie à plus haute résolution, et pour obtenir des informations sur la texture et la composition minéralogique et chimique élémentaire des roches. Ses analyses sont effectuée par le spectromètre d'ablation laser à fluorescence X PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry), assisté de sa caméra micro-contextuelle de haute résolution (MCC). Ou par le spectromètre laser ultraviolet SHERLOC (Scanning for Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals), assisté par une macro-caméra contextuelle (ACI) et de la caméra WATTSON pour la détection de minéraux, de molécules organiques ou de la signature de micro-organismes. Le tout peut-être complémenté par une expérience LIBS avec le micro-imager laser SperCam, pour obtenir la composition chimique (atomique et moléculaire) des roches et des sols, ou d'autres bio-signatures potentielles grâce au spectromètre Raman et au spectromètre visible et infrarouge (VISIR) qui agissent de concert avec le micro-imager laser SperCam.

Le résultat des analyses détermine si l'expérience d'échantillonnage peut aller plus loin. Dans l'affirmative, la perceuse rejoint le carrousel des forets interchangeable et sélectionne un foret creux contenant un tube vide. La séance de forage et de carottage est effectuée après avoir déplacé le bras robotique et positionné la tourelle de manière stable (test de précharge) en alignant puis en appuyant les stabilisateurs de la perceuse contre sa cible. Après une première vérification qu'il y a bien un échantillon dans le tube effectué par les caméras de navigation NacCams ou par les caméras Mascam-Z, l'échantillon est conduit au carrousel pour y être déposé. La rotation du carrousel donne l'accès au tube au petit bras robotique (SHA) du système de manipulation et de mise en cache des échantillons, qui extrait alors le tube du foret de carottage. Après traitement et validation par la caméra CacheCam, les tubes sont scellés avec un joint hermétique et déposés dans un espace de stockage, jusqu'au moment ou ils seront déposés sur le sol martien pour y être récupérer plus tard lors d'une futur mission de récupération pour leur retour sur Terre.

Perseverance qui a presque terminé sa phase de mise en service incluant celle de l'hélicoptère Ingenuity le 1er juin 2021 au Sol 100, et à ce moment là de la mission les différentes caméras du rover avaient déjà pris plus de 75 000 images. La quête sur la couche de font du cratère faisant partie de la formation fracturée « Máaz » de composition mafique (Figure 1) peut commencer, même si les capacités du mode de conduite AutoNav et les tests du système de manipulation et de mise en cache des échantillons ne sont pas encore complètement terminé, ils seront tout simplement vérifiées en court de route. Le but est de faire un aller-retour rapide vers la région sud de la formation « Séítah », puis de revenir en arrière en longeant la crête de « Aruby Ridge » d'un peut plus d'un kilomètre de long sur environ 4 à 6 mètres de haut, et de remonté ensuite vers le site d'atterrissage tout en effectuant des campagnes d'échantillonnages en court de route. La phase suivante sera de se lancer dans une traversée rapide vers le site « Three Forks » situé à la base sud-est du delta de Jezero vis-à-vis les falaises « Franklin Cliffs ». L'astromobile roule sur un terrain facile et très plat ayant que très peut d'obstacles sur sa route, si ce n'est que quelques cailloux dispersés le long du trajet. Profitant de ses conditions très favorables sur le

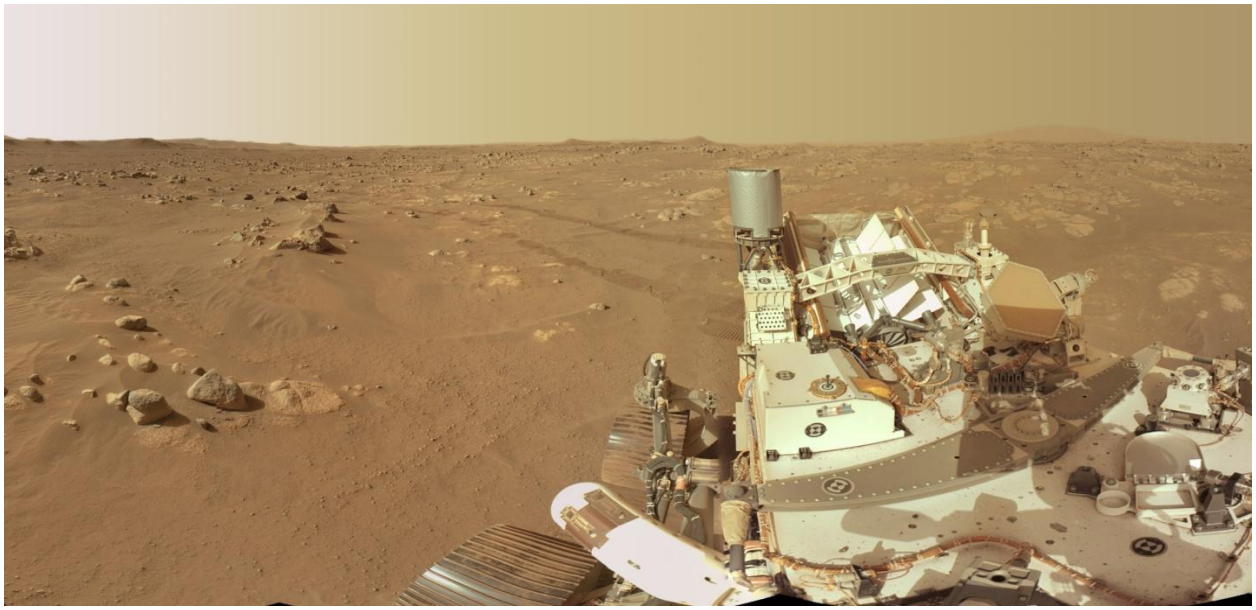


Planche 2 : Panorama couleur de 360° composé d'une mosaïque de cinq images assemblée prise par la caméra NavCam de gauche au Sol 91 (23 mai 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/James Sorenson)

Figure 2 : Sol 103, caméra NavCam pris vers 15h11 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 3 : Sol 104, caméra NavCam pris vers 14h48 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

terrain, la conduite en mode autonome avec AutoNav est testée sous surveillance aux Sols 99 et 107 sur de très courtes distances inférieures à dix mètres (Figure 2 et 3). Au Sol 109 le 10 juin 2021 positionnée à l'ouest du petit cratère « Adziilii » (qui signifie « puissance » en Navajo) d'une soixantaine de mètres de diamètre, l'astromobile reçoit l'instruction de prendre la direction plein sud. Une séance de conduite de test en mode AutoNav[28] sans prise en charge d'évitement d'obstacle est menée au Sol 113. Après un cours déplacement de 46,15 mètres effectué au Sol 116, le rover fait une petite pause de cinq jours entre les Sols 116 et 121.

[28] Overview and Results From the Mars 2020 Perseverance Rover's First Science Campaign on the Jezero Crater Floor, 10 May 2023

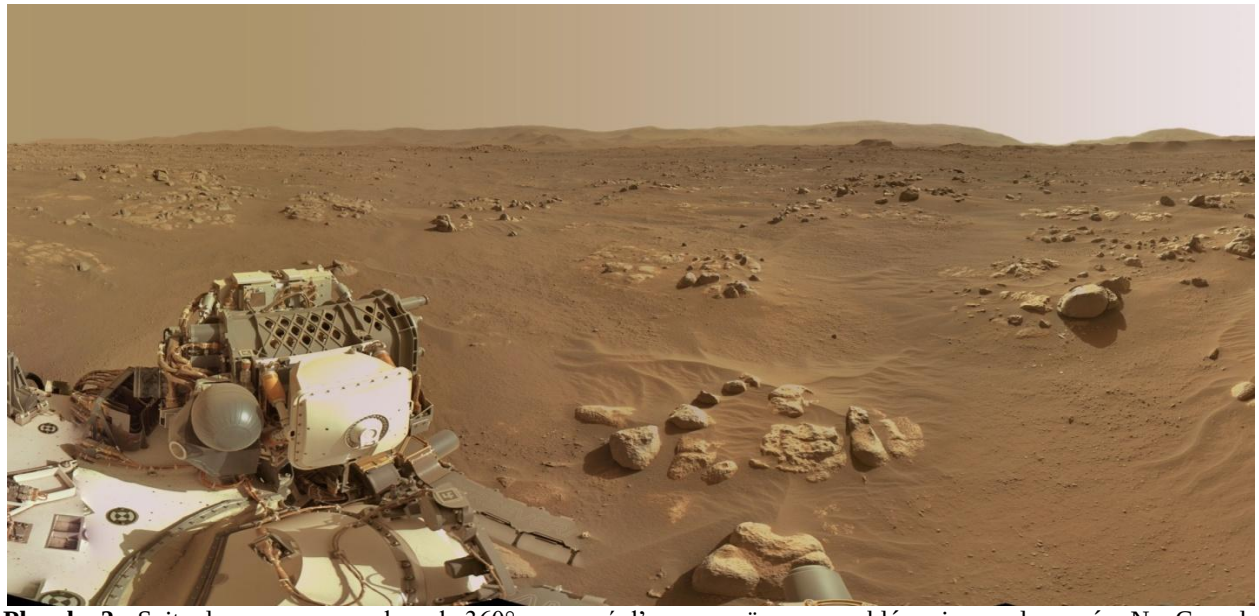


Planche 2 : Suite du panorama couleur de 360° composé d'une mosaïque assemblée prise par la caméra NavCam de gauche au Sol 91 (23 mai 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/James Sorenson)

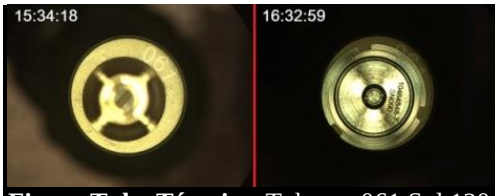


Figure Tube Témoin : Tube no 061 Sol 120 (Crédit **:** NASA/JPL-Caltech)

Perseverance transportait un tube témoin qui avait été activé et exposé à l'environnement ambiant depuis son installation sur le rover, pour qu'il puisse capturer tous les contaminants depuis le lancement jusqu'à l'atterrissage sur Mars. Sur le Sol 120 le 22 juin 2021 vers à 16h32, le tube témoin a été définitivement scellé comme étant le premier traitement réussi d'un tube d'échantillon (Figure Tube Témoin). Deux jours plus tard, une nouvelle séance de conduite de test en mode AutoNav est menée sur le Sol 122, mais cette fois-ci avec prise en charge de contournement de petit obstacle sur une courte distance de 31 mètres effectué en 45 minutes. A partir du Sol 128 le 30 juin 2021, l'astromobile amorce le contournement par le nord-est d'un petit cratère de faible profondeur d'une centaine de mètres de diamètre, qui délimite la transition d'une zone de terrain recouverte par un champ de dune présentant des ondulations de faible ampleur. Le premier kilomètre parcours à la surface de la planète Mars est atteint deux jours plus tard au départ du Sol 130 le 2 juillet 2021, au moment ou l'astromobile franchit pour la première fois le cap des cents mètres parcourus lors d'une même séance de roulement quotidien à la surface de la planète Mars avec un parcourt de 125,43 mètres, dont 109 mètres qui ont été effectué seul et entièrement en mode AutoNav. Une performance de conduite qui deviendra par la suite normale, dont une partie sera combinée avec le mode de conduite AutoNav, et qui a certaine occasion dépassera régulièrement les 200 mètres parcourus en une journée, soit environ deux fois la performance de rover Curiosity dans le cratère Gale.

Lors du neuvième vol du petit hélicoptère Ingenuity effectué au Sol 133 le 5 juillet 2021, totalisant un long déplacement de 625 mètres vers le sud-ouest en direction de la crête « Artuby Ridge ». Le petit hélicoptère Ingenuity volant à une altitude de 10 mètres, a put observe un champ de dune qui pouvait présenter un danger potentiel pour Perseverance. Grâce à ce vol de reconnaissance, une nouvelle trajectoire de conduite a été tracée pour contourner le champ de dune et d'éviter ainsi des pièges à sable qui aurait put immobiliser ou ralentir la progression du

robot. Il s'agit d'une vielle hantise laisser par l'aventure qui c'est produit à la dune « Purgatory », qui a immobilisé l'astromobile Opportunity durant plus de cinq semaines et demi en 2005. Au court de son trajet vers le sud, l'astromobile assisté du mode de conduite AutoNav parcours plus de 440 mètres en quatre séances de roulement quotidiens entre les Sols 129 et 135.

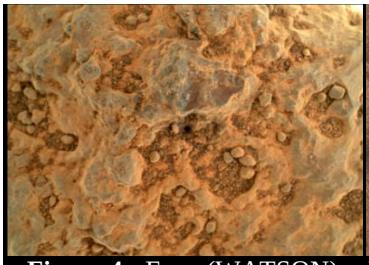


Figure 4 : Foux (WATSON)

Figure 5 : Flight Abrading Bit (Crédit **:** NASA/JPL-Caltech/MSSS)

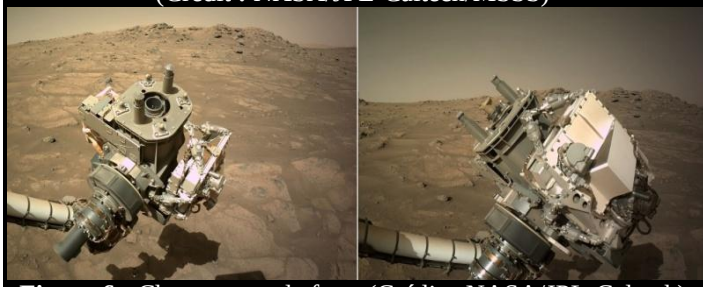


Figure 6 : Changement de foret (Crédit **:** NASA/JPL-Caltech)

L'astromobile arrive à l'entrée nord de la zone dénommé « Polygon Valley ». Il s'agit d'une zone composé d'un alignement d'affleurements rocheux plats en forme de dalle faisant partie de la formation « Máaz » (« Crater Floor Fractured Rough »). Le robot en profite pour amorcer une vaste campagne d'étude du terrain d'une durée de deux semaines entre les Sols 137 et 152 du 9 au 25 juillet 2021. Un gros plan de la cible de roche se trouvant sur le pavé d'affleurement dénommé « Foux », est exécuté par la caméra WATSON au Sol 138 (Figure 4). Mais avant de préparer la première véritable campagne d'acquisition d'échantillons, le rover Perseverance doit procéder au nettoyage de la tourelle pour se débarrasser des contaminants terrestre potentiel provenant du système de carottage (Sols 147-150). Pour ce faire, le robot doit trouver un espace libre, puis de levé le bras robotique dans les airs et d'actionner la perceuse en mode percussion un court instant pour faire vibrer la tourelle. Le premier test d'abrasion et de polissage de la surface d'une roche de Mars par la perceuse, est exécuté avec le foret/trépan de lancement « Flight Abrading Bit » au Sol 147 le 19 juillet 2021, sur la cible « Beaujeu » qui se trouve au-dessus du pavé d'affleurement dénommé « Foux » (Figure 5). Il s'agit d'un foret abrasif installer avant le départ vers Mars pour sceller et assurer une étanchéité contre la contamination du mécanisme du carottier, et destiné a être déposé à la surface au début de la mission pour être remplacé par l'un des forets non contaminé du carrousel (Figure 6). Pour obtenir un profil plus détaillé sur la composition chimique présente dans les roches, les cartes numériques (d'éléments radiologiques) de l'instrument PIXL (Spectromètre d'ablation laser à fluorescence X) peuvent être combinées avec les cartes minérales produites par les spectromètres (Spectroscopie Raman et de luminescence UV) de SHERLOC et des images produites par son partenaire WATSON. L'instrument SHERLOC utilise un laser ultraviolet pour identifier certains minéraux présents dans la roche, tandis que la caméra WATSON prend des images en gros plan pouvant aider à déterminer l'origine de la roche et du contexte environnemental de sa formation.

L'astromobile reprend la route vers l'extrémité sud de « Polygon Valley » au Sol 53, et arrive près d'un nouveau site d'intérêt géologique et scientifique au Sol 157 le 30 juillet 2021, ou le rebot entame une nouvelle campagne d'étude d'une dizaine de jours jusqu'au Sol 168 le 10 août 2021. La première campagne de carottage débute avec le nettoyage de la surface d'une cible dénommée « Guillaumes » qui se trouve sur le pavé d'affleurement polygonal baptisé « Roubillon » (Figure 7:A). La surface de la roche est abrasée sur 8 mm de profondeur pour 5 cm de diamètre, puis dépoussiérée (gDRT) entre 12h28 et 12h50 au Sol 160 le 2 août 2021.

Dévoilant, après l'examen effectué par les différents outils scientifiques de la tourelle, une texture et une composition diversifiée (scans SHERLOC aux Sols 161 et 162 et scan PIXL au Sol 167), qui suggère de multiples épisodes d'altération aqueuses ayant pu affecter les roches du fond du cratère. Sur le Sol 163 le 4 août, Ingenuity qui est toujours stationné au nord de « Raised Ridges » depuis le Sol 152 (vol 10), exécute son onzième vol en se déplaçant vers le nord-est en longeant la région sud de la crête « Artuby Ridge » sur une distance de 380 mètres, afin de pouvoir assurer la reconnaissance aérienne du terrain de la région sud de « Séítah ».

Figure 7 A : Guillaumes Sol 160 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

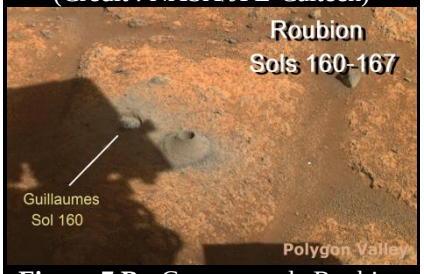


Figure 7 B : Campagne de Roubion (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 7 C : Tirs laser de SuperCam (Crédit : NASA/JPL-Caltech/LANL/ CNES/IRAP)

L'astromobile se prépare ensuite au carottage en changeant le foret abrasif fixé sur la perceuse à percussion rotative, que le robot dépose dans le carrousel pour sélectionnant un foret de carottage. Le carottage est effectué à droite de Guillaumes au début de l'après-midi vers les 13h30 au Sol 165 le 7 août 2021 (Figure 7:B). Les images de validation de la Mastcam-Z et de la caméra CacheCam à l'intérieur de l'Adaptive Caching Assembly (ACA, le matériel de traitement des tubes), montre un tube vide, aucune carotte de roche n'avait été collectée dans le tube d'échantillon numéro 233 de « Roubillon ». Le processus de collecte et de mise en cache des échantillons étant automatisé, aucune anomalie n'a été détectée lors de la collecte et du traitement du tube au Sol 164. Chaque procédure automatisée du dispositif a pleinement réussis leur tache, ce qui a abouti à un tube d'échantillon vide et hermétiquement scellé (à 19h11), à l'exception de plusieurs petites particules de poussière martienne, ce qui a été confirmé par la sonde volumique qui pèse les échantillons contenue dans le tube et qui n'a rien détecté à l'intérieur. Il semble que le forage à réduit la roche en poudre et en petits fragments qui n'était pas suffisamment robuste pour produire une carotte. Ce qui a conduit à élaborer une nouvelle séquence de validation en vérifiant le contenue du trépan/foret de carottage avant de transférer le tube dans le mobile de traitement des échantillons. Une expérience LIBS est ensuite menée en début d'après-midi sur le Sol 168 avec une séquence de tirs laser de SuperCam sur les parois intérieur du trou foré, en dessinant en alignement double de quatre troues de 30 tirs de laser chacun, et de deux autres séquence de 30 tirs de laser supplémentaire effectuées sur le bord inférieur du forage (Figure 7:C). D'autres séances de tirs avec le laser de SuperCam ont également été effectuées dans la zone de travail pour documenter le site de carottage à « Roubillon ».

L'astromobile repart ensuite vers le sud en direction d'un grand affleurement rocheux stratifié dénommé Mure (Figure 8), qui est le point d'appuis situé à l'extrémité sud-est de ce qui compose la ligne de crête « Artuby Ridge » d'environ un kilomètre de long sur une moyenne de 1,5 mètre de haut. Le lendemain au Sol 169 le 11 août 2021, après un repos bien mérité d'un Sol, le temps de recharger complètement les batteries du robot. Perseverance reprend la route vers le nord-est en longeant la base se trouvant sur le côté nord de la crête « Artuby Ridge », pour se

Planche 3 : Panorama couleur de 360° pris par les caméras NavCams au Sol 178 (20 août 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

Figure 8 : Mure Sol 173
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

diriger vers la région sud de « Séítah ». Le rover parcours 309,46 mètres supplémentaire en quatre séances de roulement quotidien entre les Sols 169 et 173 (Figure 9). La campagne d'étude menée sur la cible rocheuse baptisée Entrevaux d'environ 25 cm de longueur au Sol 173 le 15 août 2021, qui est situé à la base de la crête « Artuby Ridge » et présentant une texture friable, a dévoilé pour la première fois la présence d'olivine entrant dans la composition minéralogique d'une roche. L'olivine a été identifiée lors d'une expérience LIBS du micro-imager laser SuperCam et par les données fournis du Spectromètre visible et Infrarouge VISIR. Jusqu'à ce stade de la mission, l'olivine n'avait pas encore été détectée dans les roches, mais uniquement dans les sols de la formation « Máaz » pauvre en olivine, contrairement aux roches de la formation « Séítah » qui sont riche en olivine. Cette découverte implique que Perseverance avait rencontré pour la première fois des roches de la formation « Séítah » au cours de sa mission sur Mars. Le lendemain au Sol 174, le petit hélicoptère Ingenuity bat le record de durée lors de son douzième vol effectué le 16 août 2021, en parcourant une distance de 450 mètres en 169,5 secondes en faisant un simple aller-retour à partir de son aérodrome Airfield H (le huitième). Et trois jours plus tard au départ du Sol 177, l'astromobile franchis son deuxième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Une nouvelle expérience LIBS du micro-imager laser SuperCam et du Spectromètre visible et Infrarouge VISIR est effectuée sur la roche « Aiguines » au Sol 178, qui confirme à nouveau la présence d'olivine entrant dans la composition minérale d'une roche (Planche 3). La première

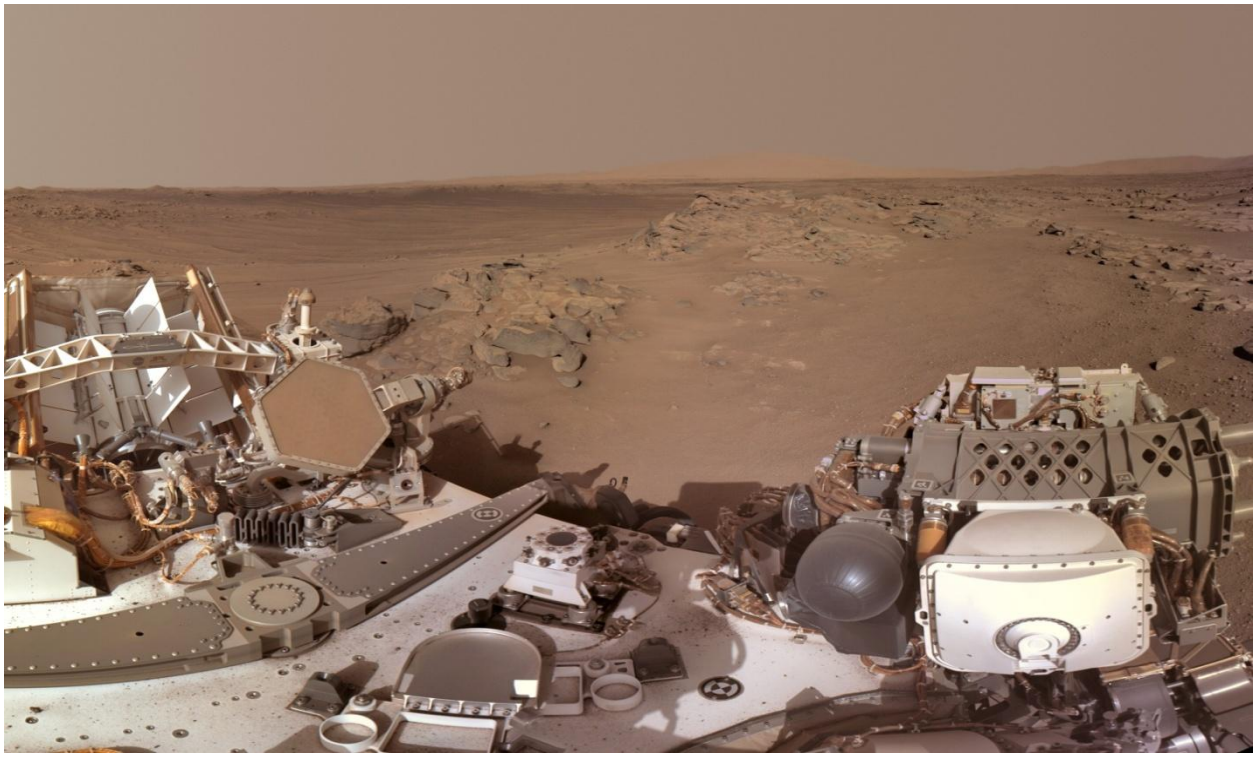


Planche 3: Suite du panorama couleur de 360° pris par les caméras NavCams au Sol 178 (20 août 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

Figure 9 : Sol 173, caméra NavCam pris vers 15h25 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

détection de carbonates par SuperCam est également effectuée au Sol 178 en identifiant la calcite ($CaCO_3$) sur une cible se trouvant sur « Aiguines ». La prochaine étape est de rejoindre un nouveau site de carottage qui se trouve un peut plus loin baptiser « Citadelle » entre les Sols 178 et 199 du 20 août au 11 septembre 2021 (Planche 4). Les rochers contenus dans la zone de travail de « Citadelle » constituent de bonnes cibles pour amorcer une deuxième tentative de carottage. Contrairement au dernier carottage échoué effectué avec le foret à la position verticale sur le pavé d'affleurement plat et lisse de « Roubillon », les rochers du site « Citadelle », qui recouvrent l'escarpement « Artuby Ridge », sont d'apparences beaucoup plus solides et plus hautes par rapport au sol. Ce qui donne l'opportunité de pouvoir forer avec un angle d'approche plus en diagonale, offrant une meilleure résistance contre l'écoulement de l'échantillon de carottage. La roche « Rochette » (prochaine cible d'intérêt géologique) de forme allongée et de teinte sombre d'environ 40 cm de diamètre, est visible dans la partie inférieure de l'image de gauche du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z du site « Citadelle » (Planche 4). Le solstice d'été arrive trois jours plus tard dans l'hémisphère Nord de la planète sur le Sol 183 le 25 août 2021.

Planche 4 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (34-mm zoom) du site Citadelle le long d'Artuby Ridge au Sol 181-182 (23 et 24 août 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

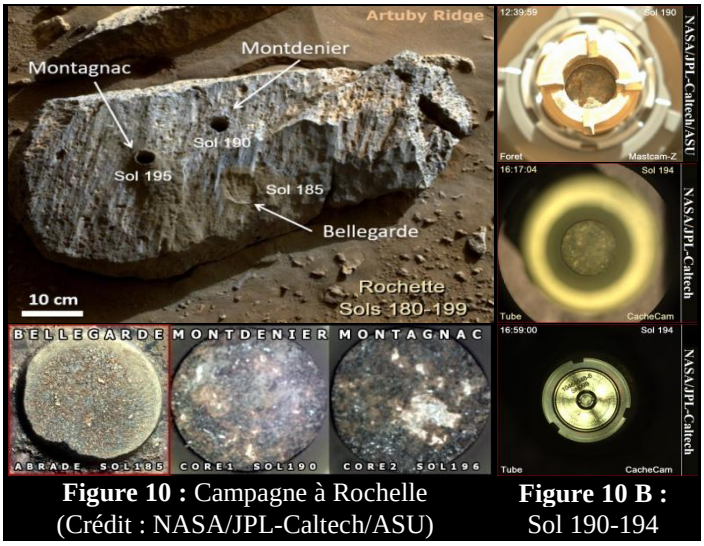


Figure 10 : Campagne à Rochelle (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 10 B : Sol 190-194

La campagne de carottage effectué à « Rochette » débute avec l'abrasion et le brossage de la cible « Bellegarde » qui se trouve sur la roche à 13h41 au Sol 185 le 27 août 2021 (Figure 10). Le nettoyage de la couche externe de la cible « Bellegarde » a permis de mieux comprendre la texture de la roche. L'étude s'est poursuivit avec l'instrument scientifique SHERLOC qui à utilisé son spectromètre laser ultraviolet, ses caméras (macro-caméra contextuelle autofocus) et WATSON sur le Sol suivant, dans l'objectif d'identifier d'autres molécules et minéraux présents dans la roche. Pour plus d'efficacité les scans SHERLOC des cibles d'abrasions sont effectués en générale après le coucher du soleil, entre 19h00 et 23h00 lorsque la température de l'air se situe entre -50 °C et -70 °C. Les analyses PIXL sont également effectuées durant la nuit sur le Sol suivant l'analyse de SHERLOC, en prenant des photos rapprochées de la roche avec la caméra MCC (micro-contextuelle de haute résolution), et pour faire l'analyse de la composition élémentaire via la fluorescence X. Les analyses de la roche ont révélées une composition compatible avec un basalte altéré par voie aqueuse avec la trace de minéraux salins (sulfates et phosphates de calcium). La perceuse à percussion rotative s'arrime ensuite au carrousel à mèche interchangeable pour y déposer le foret abrasif et de l'échanger pour un foret de carottage, après que le petit bras robotique SHA du dispositif de manipulation des échantillons est pris le soin d'introduire un nouveau tube vide à l'intérieur du foret au Sol 189. Le premier forage de carottage sur la roche est effectué le lendemain sur la cible dénommé « Montdenier » vers 12h33 le 1er septembre 2021 au Sol 190 avec le foret contenant le tube no 266.

Après plusieurs tentative pour confirmé la présence d'une faible quantité d'échantillon de roche à l'intérieur du tube contenue dans le foret de carottage par les Mastcam-Z (Figure 10 B:a).

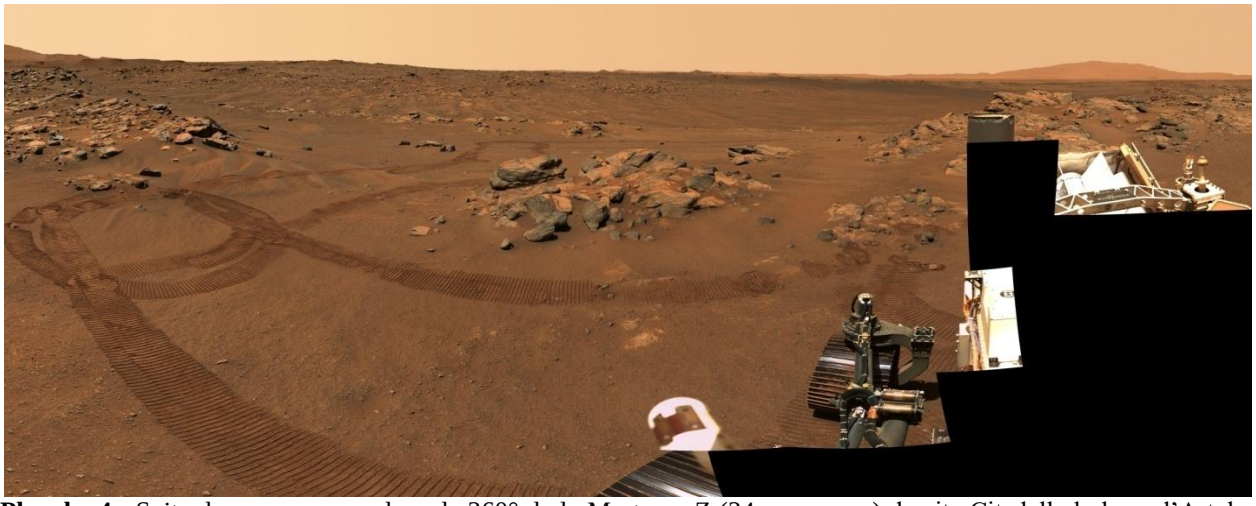


Planche 4 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (34-mm zoom) du site Citadelle le long d'Artuby Ridge au Sol 181-182 (23 et 24 août 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

La perceuse s'arrime de nouveau au carrousel pour y déposer le foret, avec la confirmation que le tube contient désormais une quantité suffisant d'échantillon de roche pour poursuivre l'expérience de mise en cache. La rotation du carrousel rotatif donne accès au foret de carottage à l'espace intérieur de l'astromobile, permettant ainsi au petit bras robotique SHA du dispositif de traitement et de mise en cache de retirer le tube no 266 du foret pour que ce dernier soit traité et scellé quatre jours plus tard en fin de l'après-midi à 16h53 au Sol 194 le 6 septembre 2021 (Figure 10 B:b et c). Seul le premier processus de validation concernant le traitement des tubes sera illustré pour chaque figure servant à documenter les campagnes de forage. Le tube est ensuite rangé dans son espace de stockage. Après avoir sélectionné un nouveau foret de carottage dans le carrousel rotatif au Sol 193, le rover amorce une deuxième séance de forage et de carottage de « Rochette » sur la cible « Montagnac » en début de l'après-midi à 13h39 au Sol 195 le 7 septembre 2021. Après les validations effectuées sur la mesure du volume et par les images de CacheCam, le tube no 267 est scellé et stocké dès le lendemain en fin de soirée à 20h41, après que le sceau ait été apposé et hermétiquement fixé au Sol 196.

Figure 11 : Selfie près de Rochette au Sol 198 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La stratégie d'échantillonnage par paires sur une même cible de roche ou de régolithe, consiste à préparer deux caches de dépôts de tube d'échantillonnages distincts. La première cache sera déposée dans le cratère Jezero à la fin de la mission principale de Perseverance, sur le site prévu à cet effet dénommé « Three Forks » situé dans la partie sud-est du front du delta. Il contiendra un seul exemplaire des paires d'échantillons récoltés lors de chaque campagne de carottages effectué dans le cratère Jezero. La deuxième et dernière cache d'échantillons contiendra le deuxième exemplaire des tubes d'échantillons recueillis dans le cratère Jezero, en plus des tubes qui seront acquis au cours de la phase de la mission prolongée à travers « Nili Planum ». Cette stratégie de double cache est pour facilité une future mission de récupération dans le cadre d'un programme de collecte et de retour d'échantillon vers la Terre, comme la future mission de Mars Sample Return (MSR) de la NASA

Planche 5 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (34-mm zoom) de la partie sud de l'affleurement Martre au Sol 205-209 (17 et 21 septembre 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

et de l'ESA. Pour terminer la campagne de « Rochette », Perseverance prend un selfie des environs avec la caméra WATSON composé d'une mosaïque de 57 images prises en début de l'après-midi vers 11h45 au Sol 198 le 10 septembre 2021 (Figure 11). Le rover reprend ensuite la route vers le nord-ouest au Sol 199, et le lendemain le robot franchit une distance record de 169,83 mètres effectué en très grande partie (161 mètres) avec le système de conduite AutoNav. L'astromobile tourne à droite en direction du nord-est au Sol suivant, faisant ainsi pour la première fois son entrée dans la région sud de la formation « Séítah » (« Toe Dip »), roulant désormais sur un terrain sablonneux tout en se faufilant entre les creux des ondulations d'un labyrinthe de dunes de sable. Après avoir franchis 133,51 mètres en quatre séances de roulement quotidien vers le nord-est dans la partie sud de « Séítah », toujours en roulant prudemment dans la direction de l'escarpement Martre. Perseverance rejoint l'affleurement rocheux baptisée Bastide qui se trouve dans la partie sud de l'escarpement Martre, et après sept mois d'exploration de la surface martienne le robot s'installe pour amorcer une nouvelle campagne d'étude et d'analyse entre les Sols 204 et 209 du 16 au 21 septembre 2021.

Figure 12 : La cible Garde sur Bastide (Crédit : NASA/ JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

L'astromobile prépare un nouveau panorama couleur de 360° pour documenter la zone de travail près de l'affleurement « Martre » avec le système de caméra Mastcam-Z (zoom de 34 mm) entre les Sols 205 et 209 du 17 au 21 septembre 2021 (Planche 5), la vue résulte d'un montage composée d'une mosaïque de plusieurs centaines d'images plus petites. Au centre de l'image de gauche avec un plus fort grossissement, on peut voir juste en haut de l'instrument PIXL, fixé sur la tourelle à l'extrémité du bras robotique, le point d'entrée du rover dans la région sud de « Séítah » au Sol 201 (« Toe Dip »). Et dans la partie inférieure vers le centre de la même image, on peut voir une tache claire sur l'affleurement « Bastide », qui est le résultat de la séance d'abrasion effectué sur la cible « Garde ». L'abrasion de la cible « Garde » sur l'affleurement rocheux « Bastide » est effectuée en fin de matinée au Sol 206 le 18 septembre 2021 (Figure 12). Les observations du spectromètre VISIR du micro-imager laser SuperCam effectué sur la cible « Garde », ont révélé la présence d'olivine entrant dans la composition minérale de la roche.

Planche 5 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (34-mm zoom) de la partie sud de l'affleurement Martre dans Séítah au Sol 205-209 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

L'astromobile est à la recherche de preuve de la circulation de l'eau dans le cratère, et pour ce faire le rebot doit trouver des dépôts sédimentaires à grain fin qu'il espère trouver dans la formation « Séítah ». La taille des grains aident à savoir si le matériau a été déposé par le vent, l'eau calme comme celle d'un lac, ou par l'eau courante d'une rivière. Les conglomérats sont des cailloux à gros grains mélangés à du sable, qui agit alors comme matrice de soutient ou de ciment qui se transforme en roche dans un environnement aqueux. Les stratifications croisées peuvent être la preuve d'une sédimentation en milieux aqueux peut profond, dont les dépôts soumis aux mouvements de l'eau et des vagues enregistre les ondulations lorsque les sédiments en suspensions se dépose sur un font meuble. Il y a trois grands types de roches que sont les roches magmatiques (ignées et volcaniques), les roches métamorphiques (solidification de roches sédimentaires) et les roches sédimentaires. Tout les types de roches peuvent formées des roches sédimentaire lorsqu'elles sont soumissent à l'érosion par le vent, l'eau, ou par d'autre type d'altérations chimiques et environnementale qui réduise les pierres en sable et en poussière. Les roches magmatiques (ignées et volcaniques) vont plutôt donner des sédiments à base de silicate de fer (matériaux mafique très dense), comme l'olivine et de pyroxène riche en oxyde de fer et de magnésium (Mg). Tandis qu'en zone de subduction, comme c'est le cas pour la Terre contrairement à Mars, l'eau participe au processus en favorisant la formation des silicates d'aluminium (matériaux felsique moins dense). Il existe trois modes de fabrication des roches sédimentaires. En premier lieu il y a les roches sédimentaires d'origine détritique, d'aspect friable et finement feuilleté en lamelle sédimentaire, elles sont formées de sédiments issus par l'altération et l'érosion de d'autres roches (éoliennes), c'est ce type de roches que les rover rencontres le plus souvent sur Mars. Ensuite, il y a les roches sédimentaires d'origine chimique constituées de particules dissoutes dans l'eau, c'est-à-dire des ions agissant comme ciment entre les grains. Des particules en solutions finissent par précipiter et forme des zones de dépôts (comme les dépôts d'évaporite) qui se transforme progressivement en roches sédimentaires pouvant atteindre des consistances très dures et compactes. Puis en dernier lieu, nous retrouvons les roches sédimentaires d'origine biologique qui sont formées par l'accumulation des restes de d'autres organismes vivants, comme les stromatolithes.

À l'époque actuelle la planète Mars n'a pas de zone de subduction, mais c'était peut-être différent dans le passé. Et en plus, la planète subit régulièrement le bombardement de météorite et

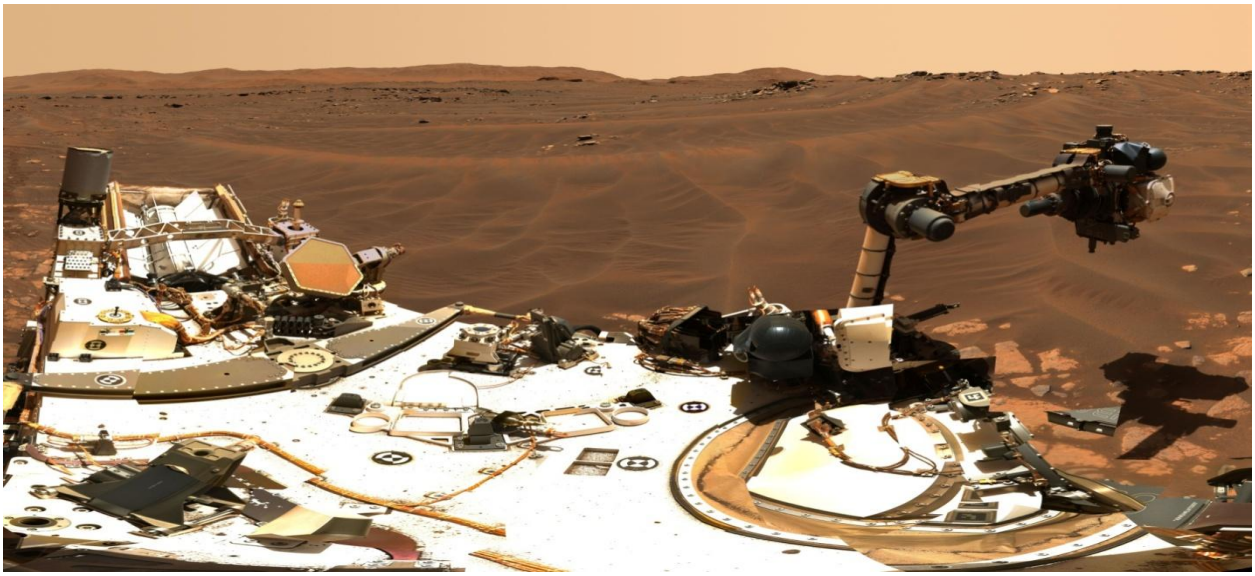


Planche 6 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (zoom 34 mm) de l'affleurement Village entre les Sols 213 et 237 (25 septembre au 20 octobre 2021) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

de gros astéroïdes qui broie et brassent en quelque sorte la croute de la planète en exposant en surface des roches ignées du manteau riche en olivine, ou lors d'éruption volcanique cataclysmique (« Plateau Tharsis » et « Elysium Planitia ») avec leurs larges épandages de lave basaltique. L'olivine réagit facilement en présence de l'eau, et dans certaine circonstance environnementale présentant des conditions de pression et de température appropriées, elle peut favoriser le processus de serpentinisation à partir de roches métamorphiques dérivées de l'altération hydratée de roches ultramafiques. Comme par exemple de la remontée d'eau chaude à travers de failles ou de fissures dans le cas de l'hydrothermalisme lors d'impacte de gros météorite. Il s'agit d'un processus géochimique qui forme la serpentine a partir de l'altération de l'olivine par l'eau avec libération de molécule d'hydrogène (H_2), qui en réagissant avec CO_2 de l'atmosphère de Mars donne du méthane (CH_4), soit une source d'énergie chimiolithotrophe potentielle sous forme de bioréacteur chimique et organique.

Les réactions redox (oxydo-réduction) entre le CO_2 et le H_2 conduisent à la synthèse de molécules à longue chaîne hydrocarbonées favorable au développement et au maintien de la vie. L'hydrogène moléculaire (H_2) produit par ces réactions peut servir de donneur d'électrons pour les activités métaboliques microbiennes telles que la réduction des sulfates, ou par la méthanogenèse (organisme méthanogène) pour la production de méthane (CH_4). L'altération chimique de l'olivine par l'eau dans une atmosphère riche en CO_2, peut également avoir une voie de synthèse abiotique via une chimique minéralogique olivine/carbonate de Mg, ou le carbonate de Mg en se cristallisant en solution formerait des dépôts en s'accumulant par précipitation tout en libérant de grande quantité d'hydrogène moléculaire. La détection de trace de méthane depuis l'orbite ou par Curiosity (en octobre 2012 aux Sols 79, 81 et 106 pour « Rocknest » et en juin 2013 aux Sols 292, 306 et 313 pour Cumberland) vient peut-être de se type de processus géochimique. Découvrir de t'elle dépôts sédimentaire de sel ou de carbonate de Mg dans le cratère « Jezero », apporterait un argument supplémentaire sur l'origine et le développement possible de la vie microbienne dans le passer lointain de la planète Mars.

Différents types de molécules à base de carbone, également appelées composés

Planche 6 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (zoom 34 mm) de l'affleurement Village entre les Sols 213 et 237 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

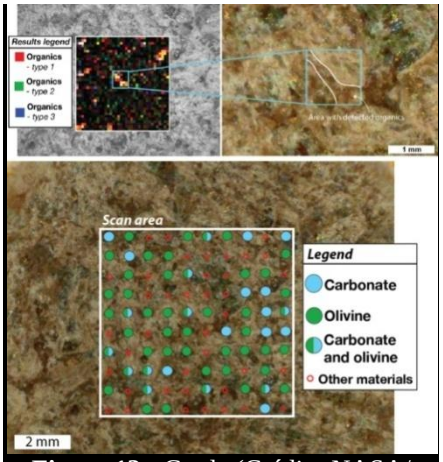


Figure 13 : Garde (Crédit : NASA/ JPL-Caltech/MSSS/LANL/PhotonSys)

organiques, ont été observés lors de l'analyse de la cible d'abrasion « Garde » par SHERLOC au Sol 207 le 19 septembre 2021[29]. Observation également effectuées par les spectromètres de SuperCam, soit par des signatures spectroscopiques d'émission atomique induite par laser (LIBS), par la spectroscopie Raman résolue en temps (TRR), et par la spectroscopie de réflectance infrarouge, à laquelle il faut ajouter les mesures du spectromètre PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry). SHERLOC (Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals) a détecté pour la première fois dans l'unité géologique de « Séítah » du cratère « Jezero », une combinaison de minéraux d'olivine et de carbonate de Mg (Figure 13). Les minéraux d'olivine représentent la partie d'une roche ignée, tandis que les minéraux carbonatés ont précipité à partir de l'eau liquide qui a interagi chimiquement avec la roche, favorisant ainsi la cristallisation et la précipitation des minéraux carbonaté en solution. Il s'agit du processus géologique connu sous le nom de carbonatation, et cela prouve que l'eau liquide a interagi de manière aqueuse avec les roches ignées de la formation « Séítah ». Des processus géologiques non biologiques peuvent également former des matières organiques. Les matières organiques trouvées dans les données de PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry) et leur association avec les roches dans lesquelles elles sont incrustées, présentent une ressemblance frappante avec les matières organiques non biologiques présentes dans les météorites martiennes, suggérant que ces matières organiques ont été formées par des processus géologiques. Par conséquent, ces découvertes organiques ne sont pas des biosignatures (des composés indiquant la présence d'un processus biologique). SHERLOC a effectué la première détection de matières organiques sur la surface martienne depuis le rover Curiosity. Il s'agit également de la première détection de matières

[29] SHERLOC's View of Organics Within Garde Abrasion Patch, 16 décembre 2021

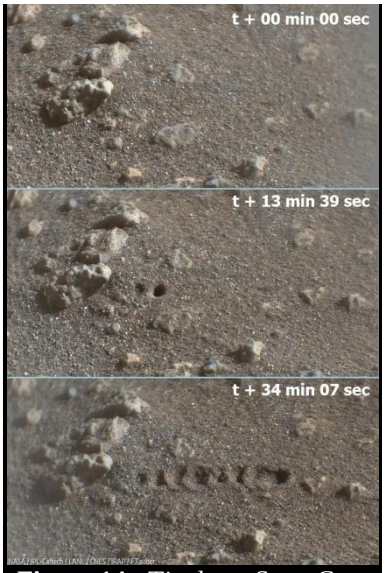


Figure 14 : Tirs laser SuperCam (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ LANL/CNES/IRAP/F. Tauber)

organiques sur la surface martienne réalisée par spectroscopie Raman et de fluorescence dans l'ultraviolet profond (alors que le rover Curiosity a utilisé une méthodologie différente connue sous le nom de spectrométrie de masse effectué par l'instrument SAM), et c'est la première découverte de la distribution spatiale des matières organiques sur la surface martienne. Les matières organiques se sont révélées être de simples composés aromatiques présents à de faibles concentrations, ce qui est similaire à ce qui a été découvert par le rover Curiosity dans le cratère « Gale » sur Mars et dans les météorites martiennes trouvées sur Terre.

Au Sol 210 le 21 septembre 2021, l'astromobile reprend la route pour contourner l'escarpement Martre par le sud-ouest dans le sens antihoraire. Le rover s'arrête près du petit affleurement « Village », dans le but de commencer à se préparer pour faire l'exploration du flanc nord de l'escarpement « Martre » après la conjonction solaire. Perseverance se prépare ensuite à passer à travers sa première conjonction solaire d'une durée de deux semaines, qui doit se produire dix jours plus tard entre les Sols 218 et 235 du 30 septembre au 18 octobre 2021. Le bras robotique sera rangé et l'astromobile exécutera une liste de commandes réduite durant cette période de quelques semaines, comme de prendre des mesures météorologiques quotidienne avec ses capteurs MEDA, de rechercher des diables de poussière (dust devils) avec ses caméras, d'activer le radar RIMFAX et de faire de nouveaux enregistrement de sons avec ses microphones. Tandis qu'Ingenuity restera immobile à 175 mètres de Perseverance, et enverra des rapports d'état au rover une fois par semaine. Mais avant d'entrée dans la période de silence radio lors de la conjonction solaire, une séquence de plusieurs tirs laser de la SuperCam est programmée sur une cible de régolithe au Sol 214 dans le cadre d'une expérience LIBS (Figure 14). Durant la longue pose obligatoire, l'astromobile en profiter pour composer un nouveau panorama couleur de 360° des lieux avec le système de caméra Mastcam-Z de gauche (34 mm) entre les Sols 213 et 237 du 25 septembre au 20 octobre 2021, la vue est composée d'une immense mosaïque de plusieurs centaines d'images (Planche 6). Le panorama nous dévoile le paysage martien qui se trouve dans la partie nord-est de l'escarpement Martre (au centre de l'image). Les deux extrémités du panorama correspondent à la région sud et couvre la ligne de crête « Artuby Ridge ».

Le rover reprend la route vers le nord-ouest au Sol 237 en longeant le flanc nord de la crête « Martre ». Deux jours plus tard entre les Sols 239 et 248 du 22 au 31 octobre 2021, l'astromobile doit de nouveau rester immobile le temps de faire une mise à jours de ses logiciels de vol (FSWX). En raison des variations saisonnières atmosphériques de Mars, qui est entrée en saison estivale ou la densité de l'aire devient de plus en plus faible en période chaude. Cette baisse a un impact significatif sur la portance et la capacité d'Ingenuity à voler, et vue de la longévité du petit hélicoptère des testes de rotations des rotors en régime plus élevé sont testés au Sol 241 le 24 octobre 2021 lors du quatorzième vol. Pour fournir une capacité de poussée supplémentaire la vitesse des rotors a été augmentée de 10% passant de 2 537 tr/min à 2 700 tr/min, la conséquence immédiate est la réduction du temps de vol qui est passé de 150 secondes à 130 secondes. Le robot effectue par la suite un court déplacement pour rejoindre le prochain site de campagne d'échantillonnage dénommé « Brac », dont l'affleurement rocheux est visible

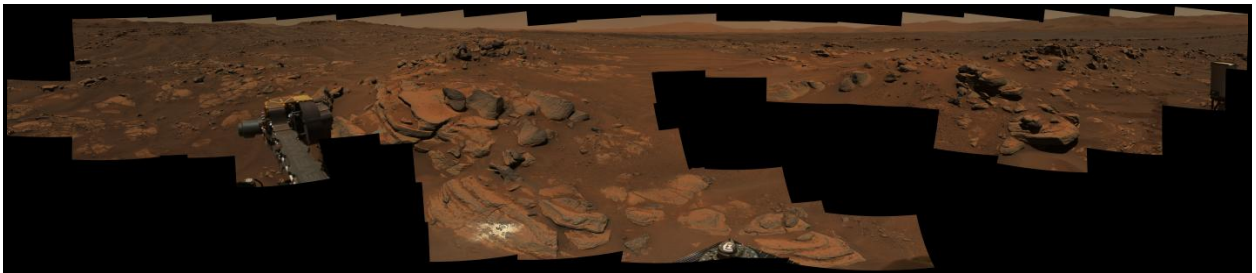


Figure 15 : La zone de travail dans les environs de Brac. Le panorama résulte du montage de 64 images de la Mastcam-Z prises entre le 6 et le 17 novembre 2021 (Sols 255-265) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

en bas vers le centre de la figure 15, et qui va devenir la première paire d'échantillons provenant de la formation « Séítah ». Perseverance va prendre le temps pour étudier le site et ses environs durant plus de quatre semaines entre les Sols 248 et 277 du 31 octobre au 30 novembre 2021 (Figure 15). La campagne de forage et d'échantillonnage au site « Brac » commence par l'abrasion sur une profondeur de 7 mm, et du dépoussiérage gazeux de la cible de surface baptisée de « Dourbes » en début de l'après-midi au Sol 253 le 5 novembre 2021 (Figure 16). L'analyse des différents instruments scientifiques de la tourelle (scan SHERLOC au Sol 269 et le scan PIXL au Sol 270) a dévoilée la présence d'olivine, de pyroxène et de plagioclase, ainsi que des traces de sulfate, de carbonate, de perchlorate, de silicate amorphe et de matière organique. La texture, la minéralogie et la chimie globale de « Dourbes » montre que l'affleurement rocheux « Brac » fait partie du membre lithologique « Bastide ». Il s'agit d'une couche géologique de gros rochée composée de roche ignée, qui s'est formée à partir de cristaux d'olivine déposée dans un corps de lave à refroidissement lent. Un magnifique coucher de soleil est capturé par les caméras Mastcam-Z vers les 18 heures au Sol 257 le 9 novembre 2021 (Figure 17). La fine poussière présente dans l'atmosphère permet à la lumière bleue de pénétrer dans l'atmosphère plus efficacement que les couleurs ayant des longueurs d'onde plus longues.

Figure 16 : Campagne de carottage à Brac (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 17 : Coucher de Soleil au Sol 257, Mastcam-Z pris vers 18h00 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Le premier échantillon de carottage de la formation « Séítah » effectué sur l'affleurement rocheux « Brac » baptisée « Salette », est collecté vers 15h sur le Sol 262 le 14 novembre 2021,

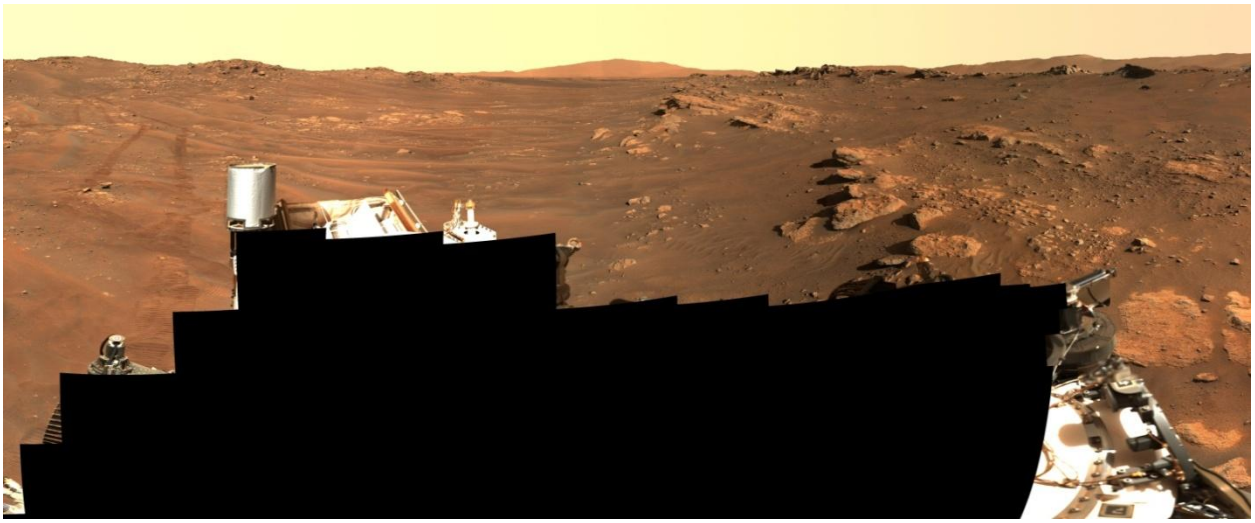


Planche 7 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34, 63 et 110 mm) entre les Sols 286 et 312 (9 décembre 2021 au 5 janvier 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

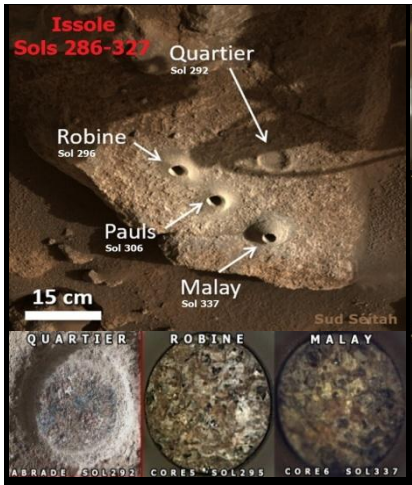


Figure 18 : Campagne à Issole (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 18 B : Validation Sol 298

et après traitement et validation le tube no 246 est scellé hermétiquement en début de soirée à 20h22. Neuf jours plus tard, s'est le tour du deuxième échantillon dénommé « Coulettes » à être forée et collectée au Sol 271 le 23 novembre 2021. Le tube no 284 est ensuite sceller hermétiquement, après validation et traitement de son contenue en début de soirée à 20h18. Le rover fait un petit détour de deux Sols au site baptisée « Hotel », puis l'astromobile reprend définitivement la route vers le sud-est au Sol 280, en revenant sur ses traces de roues pour rejoindre le site de l'affleurement rocheux dénommé « Issole ». L'affleurement est situé aux pieds de la crête « Artuby Ridge », tout près du lieu par ou le robot est entré dans la région sud de la formation « Séitah » (« Toe Dip »), que l'on peut voir dans la partie supérieur vers le centre de l'image de droite de la planche 7. En l'espace d'une semaine entre les Sols 263 et 276, les différentes caméras du rover vont détectés 10 tourbillons de poussières (Dust Devils) de différentes tailles et évoluant plus ou moins loin. La campagne d'étude et de carottage effectué sur le site « Issole » va durée plus de 41 jours entre les Sols 286 et 327 du 9 décembre 2021 au 20 janvier 2022[30]. Aussitôt arrivé sur les lieux l'astromobile prépare un nouveau panorama couleur de 360° avec les caméras Mastcam-Z (zoom 34, 63 et 110 mm) entre les Sols 286 et 312 du 9 décembre 2021 au 5 janvier 2022 (Planche 7). Le panorama est un montage composé d'une mosaïque de plusieurs centaines d'images plus petites. Sur la ligne d'horizon de la partie gauche de l'image de gauche du panorama, en suivant les traces de roues d'où est partie le rover, on peut voir la partie sud de l'escarpement « Martre ». Et en arrière plan, juste devant les parois du cratère Jezero visible au loin, nous pouvons voir à partir du centre de l'image de gauche jusqu'à l'extrémité de l'image de

[30] Samples Collected From the Floor of Jezero Crater With the Mars 2020 Perseverance Rover, 09 February 2023

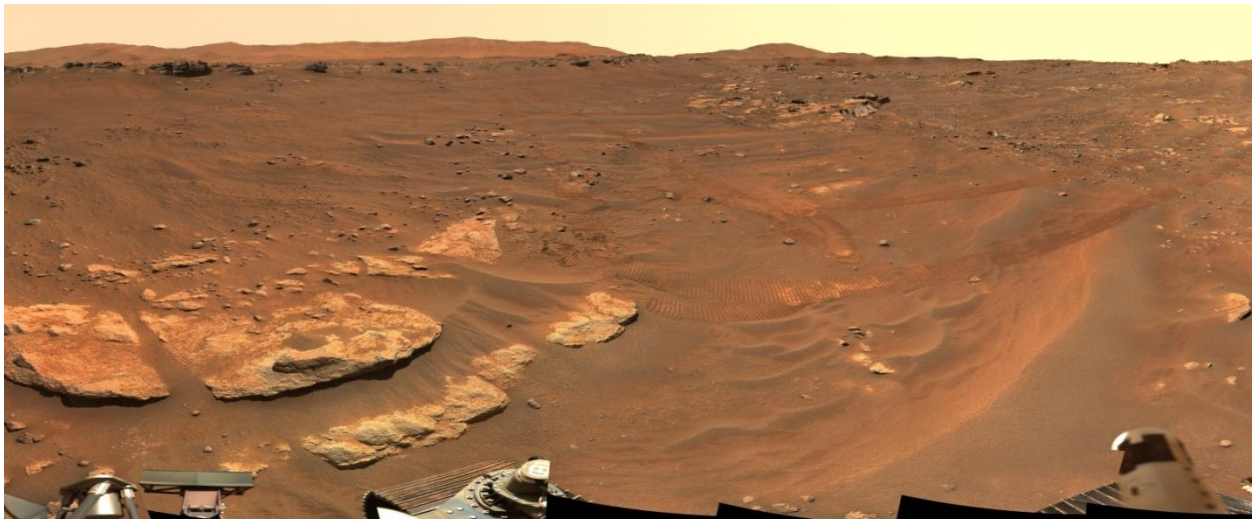


Planche 7 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34, 63 et 110 mm) entre les Sols 286 et 312 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

droite, qui couvre la zone ouest du rover jusqu'au Delta (visible sur la ligne d'horizon dans la partie droite de l'image de droite), la ligne sombre dessinée par les affleurements rocheux qui compose la crête « Artuby Ridge ».

Figure 19 : L'entrée du Carrousel (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Une première tentative d'abrasion sur l'affleurement rocheux « Issole » avait été tentée sur la cible « Soberro » au Sol 288, mais elle a échouée à cause du glissement du foret d'abrasion, ce qui a déclenchée l'abandon de la séance d'abrasion. La campagne d'échantillonnage et de carottage se poursuit par l'abrasion sur une profondeur de 7 mm et du dépoussiérage de la surface de la cible de roche baptisée « Quartier » en début de l'après-midi à 13h36 sur le Sol 292 le 15 décembre 2021 (Figure 18). Après l'étude de la cible « Quartier » à partir du lendemain par les différents instruments scientifique fixés sur la tourelle à l'extrémité du bras robotique (au Sol 293 et 304 pour SHERLOC et au Sol 294 pour PIXL). Le premier forage de carottage est effectué sur la cible baptisée « Robine » au Sol 296 le 20 décembre 2021, et après les tests contrôles de vérification standard le tube no 206 est définitivement scellé hermétiquement au Sol 298 à 17h22 (Figure 18 B). La deuxième séance de carottage est effectué sur la cible dénommé « Pauls » situé juste à droite de « Robine », le forage à lieu au milieu de l'après-midi vers les 15 heures au Sol 306 le 30 décembre 2021. Cependant, l'acquisition de l'échantillon de consistance poudreuse recueillit à « Pauls » a été empêchée par une erreur survenue lors du transfert du tube d'échantillon dans l'Adaptive Caching Assembly (faisant la jonction avec le carrousel rotatif et le matériel de traitement des tubes à l'intérieur du mobile), ce qui a empêché de poursuivre le traitement de l'échantillon du tube. Quelques petits fragments de roche tombés du tube d'échantillonnage de la carotte prélevé à « Pauls », ce sont logés dans le porte-embout à l'entrée du carrousel (Figure 19, Sol 314). Ces fragments ont empêché le foret de carottage d'être complètement inséré dans le porte-embout du carrousel durant les deux semaines suivantes, le temps de trouver une solution sécuritaire pour évacuer les cailloux. Il fut décidé d'expulser et de jeter l'échantillon du tube de la carotte forée à « Pauls » au Sol 322, et de tenter

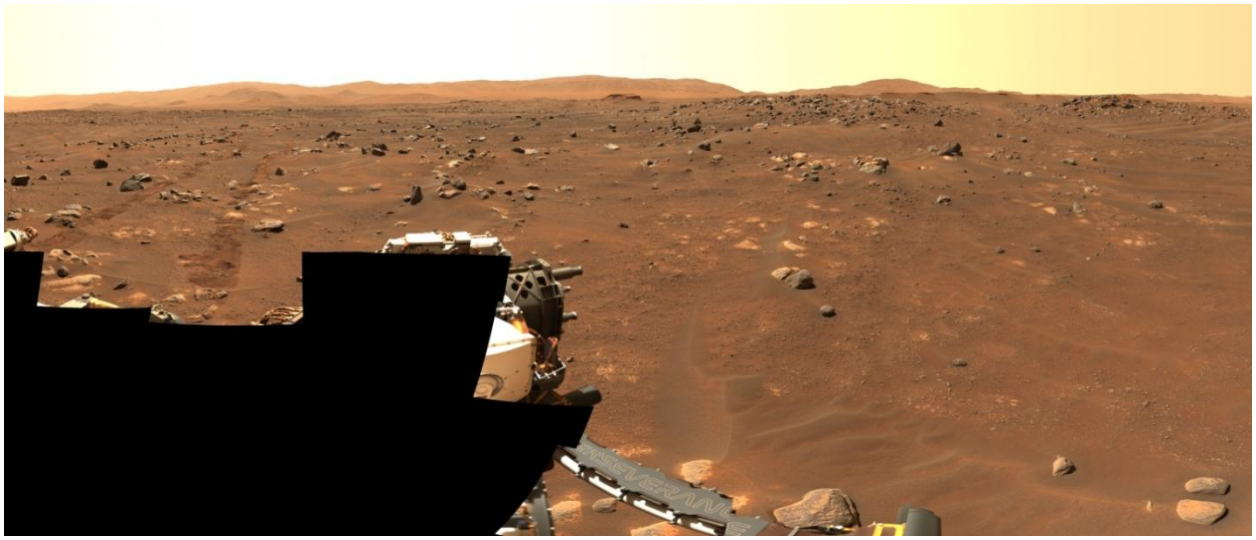


Planche 8 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) Sol 356 Adziilii Crater (19 février 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

un nouveau carottage dans une région adjacente en utilisant le même tube d'échantillonnage. Entre temps, une tempête de poussière régionale originaire du vaste cratère d'impacte « Hellas » est remontée vers le nord et est passée au-dessus du rover entre les Sols 312 et 318 du 5 au 11 janvier 2022. Au deuxième jour de la tempête sur le Sol 313 entre 11h35 et 11h59, un nombre record de 14 dust devils a été imagés et filmé par les caméras de Perseverance.

Figure 20 : Roche coincée Sol 443 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Une troisième tentative de carottage sur l'affleurement « Issole » est exécuté sur la cible « Malay » au Sol 337 le 31 janvier 2022, et après traitement et vérification par la caméra CacheCam, le tube no 261 est définitivement scellé hermétiquement en début de soirée à 19h25. Afin de trouver une forme de transition possible entre les formations « Séítah » et « Máaz », les résultats obtenus par les différents instruments d'observations scientifiques du rover dans l'espace de travail de « Issole », indique que les roches proches du site d'enquête « Issole » sont plus riche en olivine et elles font partie de la formation « Séítah ». Tandis que les roches se trouvant sur la crête « Artuby Ridge » ont montrée une signature plus faible en olivine, données cohérentes pour la partie de la formation « Máaz » qui est plus récente. Après avoir exploré la région sud de « Séítah » durant plus de cinq mois et demi depuis le Sol 201 le 13 septembre 2021. Perseverance reprend la route dans le but de revenir sur ses pas et de remonter dans le sens anti horaire vers le site d'atterrissage « Octavia E. Butter » au Sol 340 le 2 février 2022. L'astromobile repasse par-dessus la crête « Artuby Ridge » et poursuit sa route en roulant vers le sud-est. Et pour la première fois depuis le début de la mission, le robot a parcourus une distance supérieure aux 200 mètres lors d'une même séance de roulement quotidien, en franchissant 237,84 mètres sur le Sol 340. Perseverance vient ainsi de battre le record de distance parcourus sur un même Sol détenue par le rover Opportunity, qui avait parcourus une distance de 219,89 mètres au Sol 410 de sa mission le 20 mars 2005. Durant la dernière séance de roulement, l'astromobile a franchis le cap du troisième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Sur le Sol suivant (Sol 341), l'astromobile parcours une distance encore plus grande de 240,81 mètres, incluant trois petits arrêts pour faire des analyses de terrain, soit un cumulatif de plus de

Planche 8 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) Sol 356 Adziilii Crater (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

478,65 mètres en seulement deux Sols de conduite. Sur le Sol 341 le 4 février 2022, une roche c'est logée accidentellement et est resté coincé dans la roue avant gauche (Figure 20, Front Left HazCam), Perseverance roule maintenant sur le sol martien avec un passager clandestin.

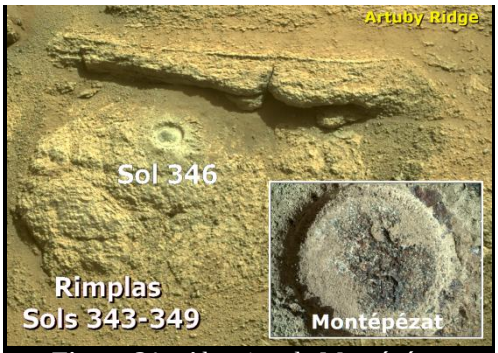


Figure 21 : Abrasion de Montépézat (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Une enquête plus approfondie sur la couche lithologique qui compose le membre « Artuby Ridge » est programmé sur l'affleurement rocheux dénommé « Rimplas », avec l'abrasion sur une profondeur de 8 mm de la cible « Montépézat » au Sol 346 le 9 février 2022 (Figure 21). Après avoir complété l'étude des environs de l'affleurement rocheux « Rimplas » sur « Artuby Ridge ». Le rebot reçois pour la première fois une séquence de navigation multi-Sol a exécutée sur les trois prochains Sols (350 à 352) en mode de conduite AutoNav. L'astromobile reprend la route en parcourant environ 100 mètres vers l'est au Sol 350, et dès le lendemain sur le Sol 351 le 14 février 2022, le robot change de direction pour se diriger vers le nord-est. Lors du dernier déplacement sur le sol martien, le rover a établit un nouveau record de distance parcourus pour une même séance de roulement quotidien en franchissant pour la première fois le cap des 300 mètres, en ajoutant au compteur un parcours de plus de 314,13 mètres. Durant cette première séance de conduite autonome de trois jours autour du coin sud-est de « Artuby Ridge », Perseverance a parcourus une distance totale de plus de 509.7 mètres (~90 mètres au Sol 352). Deux jours plus tard sur le Sol 353 (Planche 10), l'astromobile franchis le cap de son quatrième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Le rover qui fonce à toute vitesse vers le nord en direction du site d'atterrissage, fête son premier anniversaire terrestre au Sol 355 le 18 février 2022 près du petit cratère peut profond « Adziilii ». Le robot va rester quatre jours près du cratère « Adziilii » pour étudier le terrain et ses environs. Le lendemain au Sol 356 le 19 février 2022, l'astromobile prépare un nouveau panorama couleur de 360° avec les caméras Mastcam-Z (zoom 34 mm), il s'agit encore une fois d'un magnifique montage d'une mosaïque composée de plusieurs centaines d'images plus petites (Planche 8).

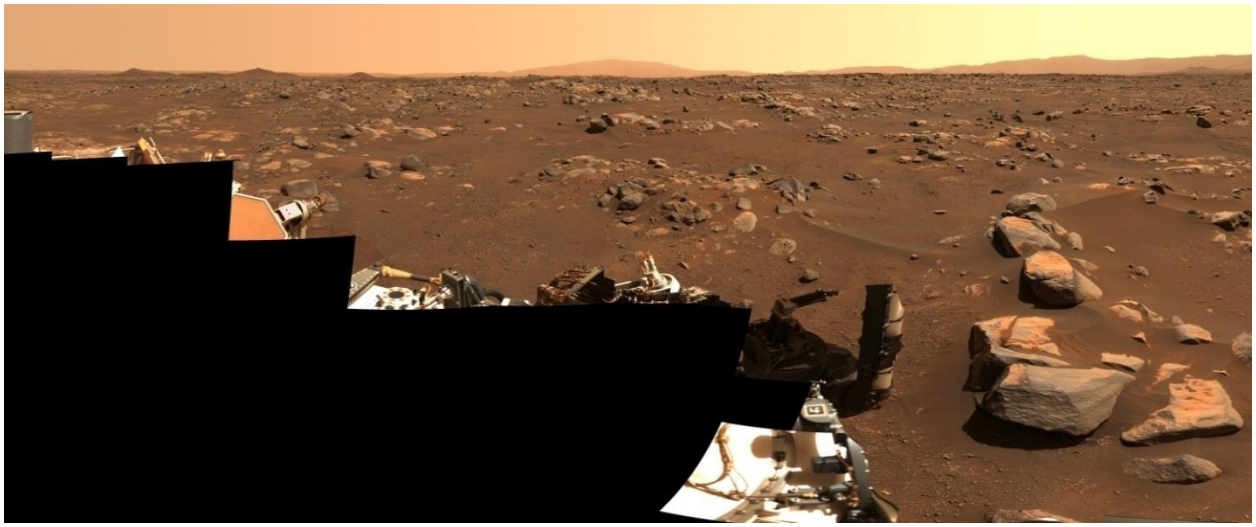


Planche 9 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) entre les Sols 363-372 “Sid and Chal Rocks” (26 février au 7 mars 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 22 : Sol 360, caméra NavCam pris vers 15h50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

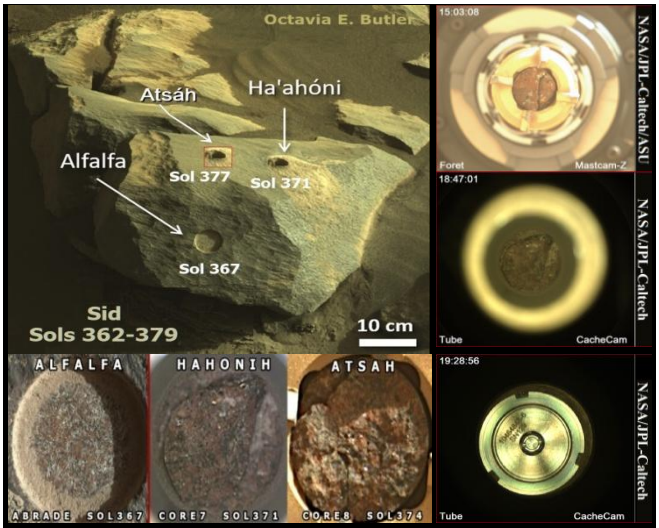


Figure 23 : Campagne à Sid (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 23 B : Validation Sol 371

L’astromobile reprend la route au Sol 359 en contournant le petit cratère « Adziilii » par le sud-est, et le lendemain sur le Sol 360 après avoir parcourus plus de 204,83 mètres vers le nord et rejoint les environs du site d’atterrissage « Octavia E. Butler Landing », avec un retour sur l'emplacement du Sol 91. Les caméras NavCams du rover entament en fin de l’après-midi un nouveau panorama couleur de 360° des environs, la vue est composée d’une mosaïque de cinq images (Figure 22). Deux jours plus tard sur le Sol 362 le 25 février 2022, c’est l’arrivé de l’équinoxe d'automne dans l’hémisphère nord de la planète Mars, et avec l’approche de la saison hivernale arrive aussi une nouvelle saison de tempêtes régionale et des tourbillons de poussière (Dust Devils, voir la figure 25). Perseverance se positionne devant le nouveau site d’intérêt géologique et scientifique dénommé « Sid » entre les Sols 362 et 379 du 25 février au 15 mars 2022 (Figure 23), et se prépare a effectuée une nouvelle campagne détaillé d’échantillonnage et de carottage. Le lendemain, l’astromobile entame un nouveau panorama couleur de 360° avec le système de caméra Mastcam-Z (zoom 34 mm) entre les Sols 363 et 372 du 26 février au 7 mars 2022. Et

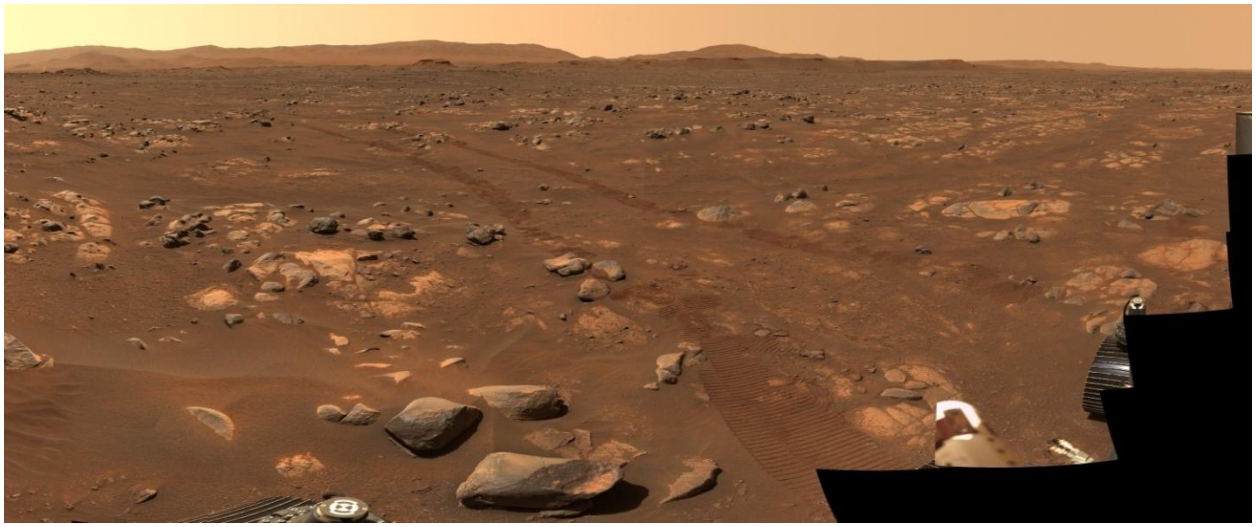


Planche 9 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) entre les Sols 363-372 “Sid and Chal Rocks” (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

comme toujours avec les caméras Mastcam-Z, le panorama est monté à partir d’une mosaïque composée de plusieurs centaines d’images (Planche 9). La roche « Sid » est visible dans la partie inférieure du côté droit de l’image de gauche du panorama.

La campagne sur l’affleurement rocheux « Sid » commence avec l’abrasion creusant sur une profondeur de 9 mm, suivit du dépoussiérage de la cible baptisée « Alfalfa » en début de l’après-midi vers les 12h30 sur le Sol 367 le 3 mars 2022 (Figure 23, avec le montage de validation du carottage « Atsáh »). Les résultats obtenues par les différentes observations effectués par les instruments scientifiques fixés sur la tourelle pour mieux caractériser la cible de roche « Alfalfa ». Ont révélé que Sid était une roche d’origine basaltique, et quelle était la plus dure à forée et la moins altéré par l’eau parmi les roches étudier jusqu’à maintenant par le robot. Le premier carottage sur la roche « Sid » est effectué vers 14h57 sur la cible baptisée « Ha'ahóni », qui signifie « persévérance » en Navajo, puis après traitement et validation le tube no 262 est scellé hermétiquement le même jour en début de soirée à 19h21 au Sol 371 le 7 mars 2022. La deuxième séance d’échantillonnage sur la roche « Sid » est effectué sur la cible dénommé « Atsáh », qui signifie « aigle » en Navajo, vers les 14 heures au Sol 377 le 13 mars 2022, et après le traitement et la validation le tube no 202 est définitivement scellé hermétiquement à 21h12. La dernière paire de carottes rocheuses a été collectée dans le membre supérieur « Ch'ał », composé de roches massives qui forment des buttes et des crêtes, et qui se présente généralement sous la forme de roches anguleuses de la taille d'un galet ou d’un rocher de couleur sombre. La stratigraphie de la formation « Máaz » d'origine ignée riche en plagioclase et en pyroxène a été subdivisée en cinq membres : Roubion (pavés surélevé), Artuby (affleurement stratifié et granulaire), Rochette (roche moyenne), Naa'táanii (pavés plats de basse altitude de forme polygonaux) et Ch'ał (roche massif sombre), Tandis que la formation « Séítah » également d'origine ignée et plus ancienne, est composée des membres Bastide (roche en couche stratifié contenant de l’olivine) et Content (roche poreuse rencontré à « Martre » riche en silicate et sans olivine). Les observations de la formation « Séítah »[31] sont compatible avec une lave ou un magma qui se refroidissant lentement en se différenciant, et la formation « Máaz » résulterait

[31] Aqueously altered igneous rocks sampled on the floor of Jezero crater, 25 Aug 2022

Planche 10 : Une étendue de rochers devant Santa Cruz, une mosaïque composée de 24 images capturée au Sol 353 par les caméras Mastcam-Z (16 février 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

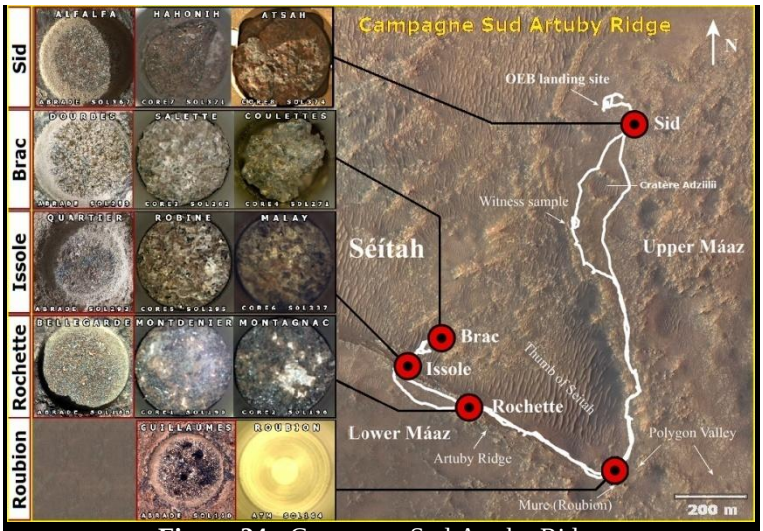


Figure 24 : Campagne Sud Artuby Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

d'une séquence de coulées de lave basaltique extrusive plus tardive recourant une partie du sommet de la formation « Séítah ».

L'astromobile vient de finir sa première campagne de carottage et d'échantillonnage effectuée dans la région sud et sur le fond fracturé du cratère Jezero, dont le but était d'enquêter sur les formations « Máaz » et « Séítah », une région que le robot a explorée durant presque 13 mois. Après avoir parcourus plus de 5 kilomètres, créés sept zones d'abrasion (formation « Máaz » (Guillaumes, Bellegarde, Montépézat et Alfalfa), et formation « Séítah » (Garde, Dourbes et Quartier)), scellées neuf tubes d'échantillons de carottages (Roubion, Montdenier, Montagnac, Salette, Coulettes, Robine, Malay, Ha'ahóni et Atsáh) et un tube témoin (Figure 24). Le rover Perseverance reprend la route vers le nord-ouest au Sol 379 le 15 mars 2022, puis tourne vers le nord en direction de l'emplacement dénommé « Three Forks » situé au pied des parois abruptes du côté sud-est du delta du cratère Jezero. Le robot quitte définitivement la zone du site d'atterrissage « Octavia E. Butler Landing », pour s'aventuré au loin vers une nouvelle aventure toujours à la recherche de nouvelle couches de roche sédimentaire.

Planche 10 : Suite d'une étendue de rochers devant Santa Cruz, une mosaïque composée de 24 images capturée au Sol 353 par les caméras Mastcam-Z (16 février 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

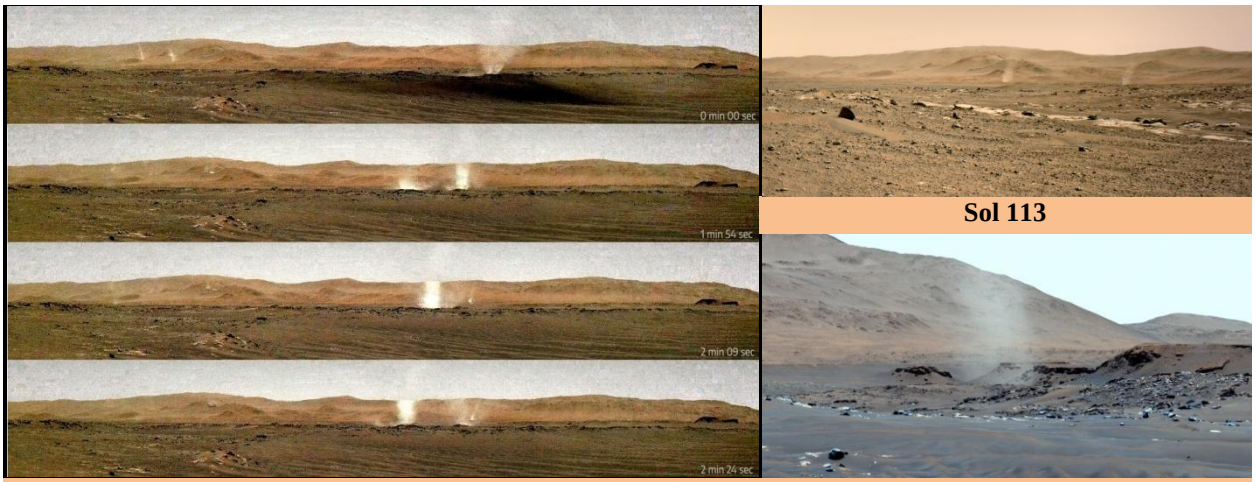


Figure 25 : Exemple de dust devils observés durant la campagne effectuée de la région Sud du site d'atterrissage (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Membre du forum UMFS & Franz Tauber pour le montage de gauche)

EN ROUTE VERS LE DELTA
(Sols 380 à 409)

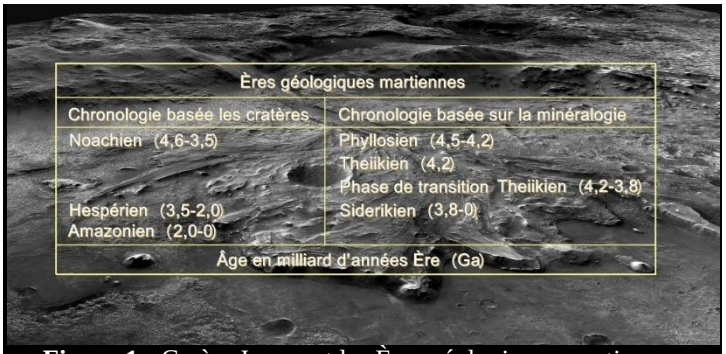


Figure 1 : Carère Jezero et les Ères géologiques martiennes (Crédit : NASA/JPL-Caltech/USGS)

Les données recueillis jusqu'à maintenant sur les formations « Máaz » et « Séítah », tout les deux d'origine ignée formées de magma ou de lave, qui tapissent le fond du plancher du cratère. Sembles indiquer que Jezero s'est formé tardivement après l'époque ou l'eau était beaucoup plus abondante et plus stable à la surface sous une atmosphère plus dense, soit après la phase de transition qui est survenu à l'époque du Theiikien (4,2 milliards d'années) (Figure 1). Le cratère Jezero contient les gisements de carbonates les plus importants détectés sur Mars depuis l'orbite avec une forte signature d'olivine. La formation de l'épaisse couche de dépôts en forme d'éventail du delta fluviaux, semble avoir été formé dans un ancien bassin lacustre qui remplissait jadis le cratère Jezero vers la fin du Noachien ou au début de l'Hespérien (~3,82 et 3,96 milliards d'années). Les premières analyses de la campagne du fond du cratère n'ont cependant pas observé de roches sédimentaires formées par l'accumulation de sable et de boue comme ont s'attendait de trouver dans un ancien environnement aquatique, mais à plus tôt observés des roches magmatiques résultant de processus volcaniques plus profonds[32] qui a modifié mais pas détruit la minéralogie ignée des roches.

Le cratère a subit à l'occasion des vagues d'inondations via le delta, et des phénomènes d'infiltration d'eau souterraine via l'hydrothermalisme, causé par la chute de gros astéroïdes ou de météorites, ou encore par des phénomènes volcanique avec couler de lave de type ultramafiques (« Séítah ») et mafiques (« Máaz ») (roches originaires du manteau martien constitué de silicate de Fe et de Mg). Comme dans le cas de la formation « Máaz » qui est composée de roches ignées pauvres en olivine, contrairement à la formation « Séítah » plus ancienne qui en contient une plus forte concentration (mélangé à une faible quantité de carbonate). Les données indiquent également que la grande majorité des analyses dévoile des épisodes secondaires multiples d'altération aqueuse des matériaux de surface, produisaient du carbonate inorganique de magnésium et de fer en milieu neutre, du phyllosilicate Fe/Mg, de l'oxyde de fer, des sulfates (Ca anhydre et Mg hydraté)[33], des perchlorates (Na) et de la matière

[32] Planète Mars : premières surprises géologiques pour le rover Perseverance dans le cratère Jezero, 25 août 2022
[33] Evidence of Sulfate-Rich Fluid Alteration in Jezero Crater Floor, Mars : 24 January 2024

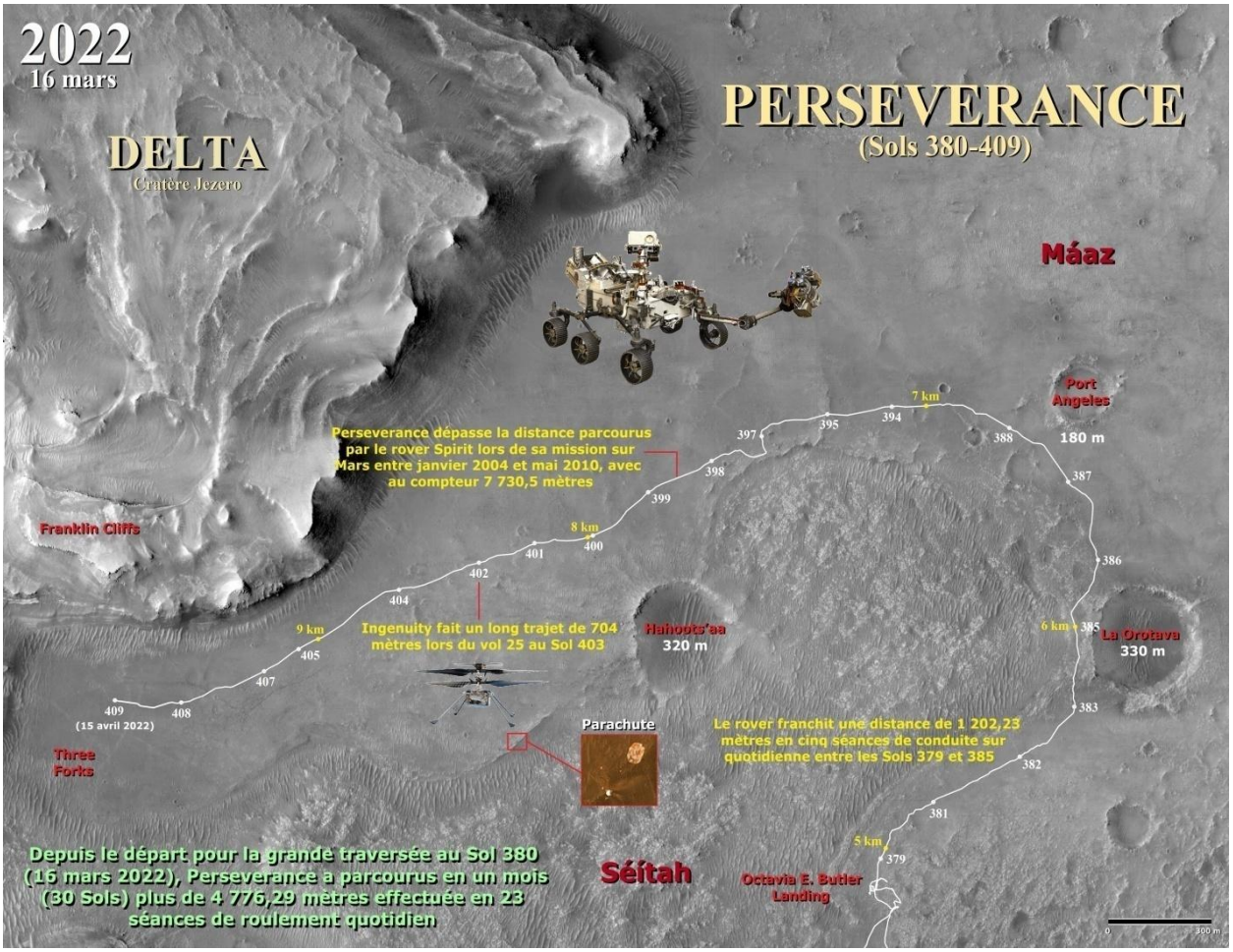


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 380 et 409. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[34] et de Phil Stooke[35] pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

Figure 2 : Sol 382, caméra NavCam au couché de soleil vers 16h20 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

organique en faible quantité (observé par les instruments de proximité IPXL et SHERLOC montés sur bras et par spectroscopie LIBS de SuperCam) comparables à celles détectées dans le cratère Gale par Curiosity. Et contrairement à Curiosity dans le cratère Gale, Perseverance n'a pas encore trouvé de fracture ou veine minéralisé de sulfate de magnésium pouvant attester une forte activité hydrothermalisme, ou de zone d'évaporite après de forte inondation avec épisode

[34] Where is Perseverance?
[35] Perseverance Route Map Archive du Forum UMSF

Figure 3 : Sol 385, caméra NavCam vers 14h30 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

d'eau plus ou moins stagnante sur des temps assez long. En plus, la distribution des phases hydratées et anhydre des sulfates dans le fond du cratère Jezero, semble indiquer qu'elles se sont déposées à un pH modéré et à basse température au cours de plusieurs événements aqueux ou lacustre (voir la référence 2). Pour aller plus loin il faut aller plus haut vers le delta, qui s'élève à environ 40 mètres au-dessus du fond du cratère, pour avoir accès à des couches de roche sédimentaire plus récente et d'entamer la campagne du Front du Delta (Fan Front Campaign).

L'aventure se poursuit dans une course folle vers le nord en direction de « Three Forks » situé au pied du flanc sud du delta du cratère Jezero à la hauteur de « Franklin Cliffs ». Cette traversée rapide pour contourner la formation « Séítah » commence dès le Sol 379 le 15 mars 2022 avec une randonnée de 198,79 mètres, puis de 252,12 mètres sur le Sol 381 ou le rover franchi le cap du cinquième kilomètre parcourus sur Mars, et de 293,69 mètres au Sol 382 (Figure 2). Durant le trajet l'astromobile prend le temps de prendre différents clichés panoramiques avec ses caméras de navigation NavCams, qui nous dévoiles le paysage martien se faufiler à travers le mouvement de l'astromobile à la surface de la planète Mars. Le lendemain sur le Sol 383, l'astromobile parcours une distance de 234,04 mètres avant de s'arrêter à la crête sud-ouest du cratère « La Orotava » d'environ 330 mètres de diamètre et de 20 mètres de profondeur. Une nouvelle randonnée de 209,85 mètres est effectuée sur le Sol 384 le 20 mars 2022, qui positionne Perseverance sur le flanc ouest du cratère « La Orotava ». Le lendemain sur le Sol 385, le robot parcourt une courte distance de 13,74 mètres pour rejoindre une zone qui lui offre une meilleure vue sur le terrain environnant (Figure 3). Le rover a franchit une distance de 1 202,23 mètres en seulement cinq séances de conduite quotidienne sur le sol martien, et la

Figure 4 : Sol 386, caméra NavCam vers 15h30 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 5 : Sol 389, caméra NavCam vers 16h00 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

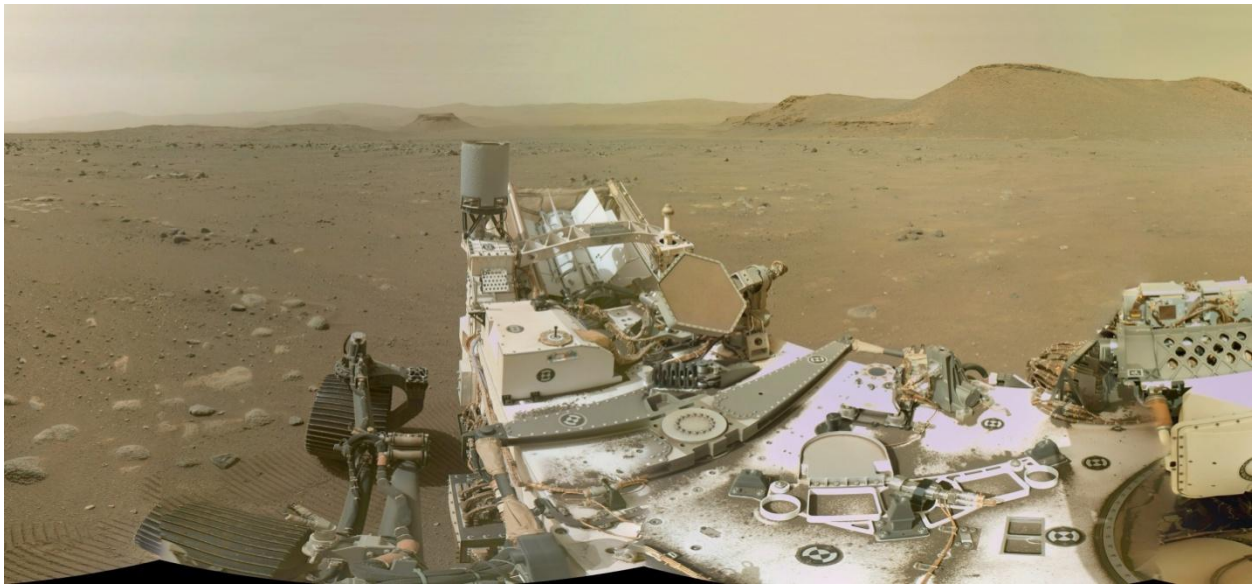


Planche 2 : Panorama couleur de 360° des caméras NavCams pris en fin de journée vers les 16 heures au Sol 405 (11 avril 2022). (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 6 : Sol 400, caméra NavCam vers 14h45 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 7 : Sol 402, caméra NavCam pris vers 15h17 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

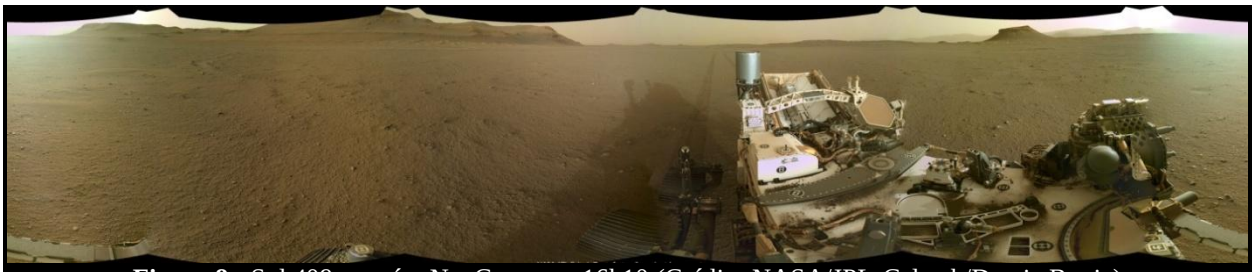


Figure 8 : Sol 409, caméra NavCam vers 16h10 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

distance parcourus entre les panoramas de la figure 2 et 3 est de 457,63 mètres. Un nouveau panorama couleur de 360° composé d'une mosaïque de cinq images, est amorcé en milieu de

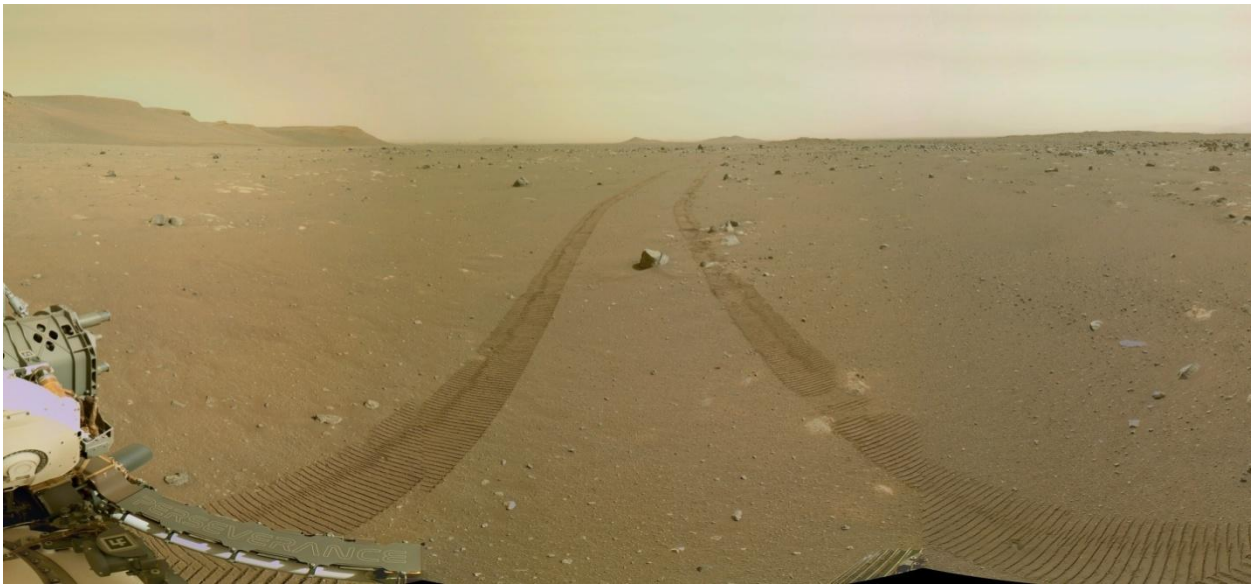


Planche 3 : Suite du panorama couleur de 360° des caméras NavCams pris en fin de journée vers les 16 heures au Sol 405 (11 avril 2022). (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 9 : Éclipse solaire de Phobos
(Crédit **:** NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/SSI)

l'après-midi vers les 15h30 par les caméras de navigation NavCams au Sol 386 le 22 mars 2022, soit juste après avoir parcourus une distance de 234,83 mètres (Figure 4) et atteint la borne du sixième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Entre les Sol 387 et 389 (Figure 5), l'astromobile change de direction et tourne à gauche vers nord-ouest sur plus de 754,3 mètres pour contourner le flanc sud du petit cratère « Port Angeles » d'environ 180 mètres de diamètre sur près de cinq mètres de profondeur. Puis en fin de parcours sur le Sol 389, un nouveau panorama couleur est entamé avec les caméras NavCams du rover en fin de l'après-midi vers les 16 heures. Après une longue pause bien méritée de cinq jours, pour faire différentes vérifications système entre les Sols 389 et 394 du 25 au 30 mars 2022. Le rebot reprend la route vers l'ouest en direction du front du delta, et durant le parcourt l'astromobile franchit la borne du septième kilomètre parcourus à la surface d'un autre monde.

Après avoir parcourus une longue distance de plus de 423,08 mètres en trois séances de conduite quotidienne en mode de conduite AutoNav entre les Sols 395 et 397. Le rover Perseverance a réussi à filmer avec son système de caméra Mastcam-Z, une courte séquence vidéo de l'éclipse solaire de Phobos en début de matinée sur le Sol 397 le 2 avril 2022 entre 8h16 et 8h21 (Figure 9). Après avoir exploré quelque peut la crête nord-ouest qui entoure et englobe la formation « Séítah », le rebot reprend sa redonnée vers le sud-ouest entre les Sols 398 et 402 du 3 au 7 avril 2022 (Figure 6 et 7). L'astromobile passe au nord du cratère « Hahoots'aa » d'environ 320 mètres de diamètre sur 10 mètres de profondeur, et parcourt une distance d'environ 1 018,04 mètres en seulement cinq séances de roulement quotidien, dont une grande partie est exécuté en mode de conduite autonome. Durant le trajet exécuté sur le Sol 399, Perseverance dépasse la distance totale du rover Spirit lors de sa mission sur Mars entre janvier 2004 et mai 2010 avec au

Figure 10 : Parachute et coque arrière au Sol 401 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

compteur 7 730,5 mètres. En court de route durant les derniers déplacements sur le Sol 400 (5 avril 2022), le rebot franchit la borne du huitième kilomètre parcourus à la surface de la planète rouge. Et le lendemain en fin de matinée sur le Sol 401 à 11h27, Perseverance photographie au loin avec son système de caméra Masctcam-Z, le parachute et sa coque arrière étendus sur le sol martien au sud du cratère « Hahoots'aa » sur la crête nord-ouest qui entour et délimite la formation « Séítah » (Figure 10). Le rebot poursuit sa route en longeant les parois du flanc sud du front du delta d'une hauteur moyenne de 70 mètres, et parcours une distance de 998,75 mètres en quatre séances de conduite quotidienne entre les Sols 404 et 408 (Planche 3). Durant le dernier long trajet sur le sol martien, une longue séance de conduite en mode AutoNav a été programmée sur le Sol 405 le 11 avril 2022, durant laquelle le robot a franchit la borne du neuvième kilomètre. À la fin du parcours effectué au Sol 408 le 14 avril 2022, Perseverance atteint la zone désigné « Three Forks », un terrain situé au pied du flanc sud des falaises abruptes du delta (« Franklin Cliffs »), et qui marque le dépars de la campagne d'échantillonnage et de carottage du front du delta (Fan Front Campaign).

La dénomination de « Three Forks » (Trois fourches) fait référence à l'endroit où existe trois possibilité d'itinéraire, ou de passages compatibles avec les capacités de l'astromobile pour franchir le sommet du delta (deux entrée via « Hawksbill Gap » situé de chaque côté de « Rocky Top », et une pour « Cape Nukshak ») jusqu'à la vallée fluviale dénommé « Neretva Vallis » qui se trouve de l'autre côté en délimitant du delta. Après avoir parcourus 214,11 mètres au Sol 409 (Figure 8), le rover Perseverance s'arrête pour une pause de quatre jours entre les Sol 409 et 413 (du 15 au 19 avril 2022).

Figure 11 : Ingenuity Vol 20 Sol 362 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Franz Tauber)

Depuis le dépare pour la grande traversée au Sol 380 (16 mars 2022), le robot a parcourus en l'espace d'un mois (30 Sols) plus de 4 776,29 mètres effectué en 23 séances de roulements quotidiens. Durant se lapse de temps, le petit l'hélicoptère Ingenuity a continué à effectuer des vols de reconnaissances en exécutant les vols 21 à 25 entre les Sols 375 et 403, dans le but de traverser la région de la formation « Séítah » en direction du delta. Un long trajet de 704 mètres est effectué sur le Sol 403 le 8 avril 2022 lors du vol 25, ce qui positionne Ingenuity à environ 900 mètres au sud-est du rover. La densité de l'air étant en augmentation à l'approche du solstice d'hiver dans l'hémisphère Nord de la planète, le régime de la vitesse des rotors d'Ingenuity repasse à la cadence régulière de 2 537 tr/min lors du vol 24.

LA CAMPAGNE DU FRONT DU DELTA (Sols 410-707)

La campagne du front du delta (Fan Front Campaign) commence entre les Sols 409 et 412, lors de l'arrivé du rover au site « Three Forks » situé au pied du front sud du delta. Le delta du cratère Jezero (3,8 milliards d'années) est un vaste dépôt fluvio-deltaïque en forme d'éventail originaire du canal fluvial « Neretva Vallis ». Les 25 premier mètres de la couche sédimentaire inférieur dans cette partie sud-est du delta (« Cape Nukshak » et « Hawksbill Gap ») a reçu le nom de formation « Shenandoah ». La couche sédimentaire composée de grès et de mudstone qui la compose, témoigne d'un ancien environnement de dépôts transitant du fluviale à lacustres (cône alluvial), suivit du deltaïques entrecoupé d'évènement éoliens qui y ont laissé leur traces à différentes époques (entre 3,83 à 3,2 milliards d'années[36]). L'astromobile reprend la route en direction sud-ouest sur le Sol 413, dans le but d'aller explorer la région sud d'un petit canal de rivière asséchée qui entour la zone dénommée « Cape Nukshak » entre les Sols 413 et 425 du 19 avril au 1er mai 2022. Perseverance parcourt une distance de 885,09 mètres en neuf séances de roulement quotidien, et pour documenter la progression sur le terrain le robot entame plusieurs panoramas couleurs avec ses caméras de navigations NavCams durant le trajet, tout en nous dévoilant le défilement du magnifique paysage martien (Figure 3 à 7).

Figure 1 : Parachute et coque arrière Sol 414 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 2 : Mosaïque de Kodiak au Sol 416 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/USGS/Franz Tauber)

Durant le trajet sur le Sol 414 le 20 avril 2022, l'hélicoptère Ingenuity explore à la demande de l'équipe de Mars Sample Return (MSR), la zone d'impact du parachute et de la coque arrière qui se trouve au sud du cratère « Hahoots'aa » lors de son 26iem vol. Le petit hélicoptère Ingenuity qui fête également l'anniversaire de son premier vol sur Mars, a décollé à 11h37 heure locale de Mars (LMST) pour survoler la région durant plus de 159 secondes à une altitude de 8 mères. Ingenuiy à parcourus une distance de 360 mètres, et durant le trajet

[36] Sedimentology and Stratigraphy of the Shenandoah Formation, Western Fan, Jezero Crater, 15 February 2024

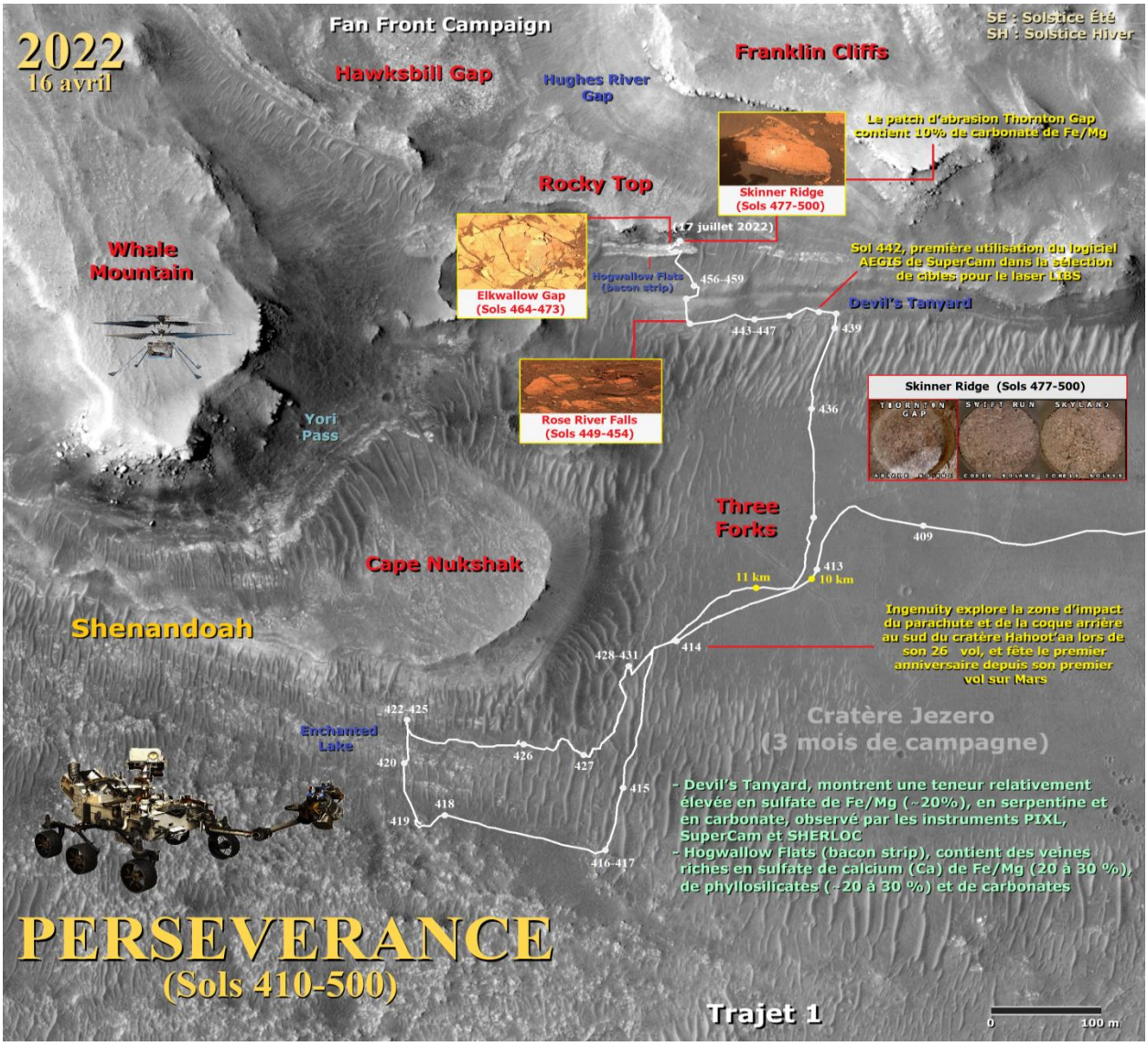


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 410 et 500. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA, et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[37] et de Phil Stooke[38] pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

l'hélicoptère a pris dix images du parachute (le plus grand déployé sur Mars), de la coque arrière et du champ de débris résultant de l'impact sous différents angles (Figure 1). À la fin du vol 26, Ingenuity avait un cumulatif de plus de 49 minutes en durée de vol et un parcouru total de plus de 6,2 kilomètres. L'astromobile franchi également sur le même Sol le cap de son dixième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Entre les mois de mars et d'avril 2022, Perseverance a roulée sur une distance record de plus de 6 kilomètres à la surface de la planète Mars, soit plus de 3 kilomètres pour chacun des mois. L'ancien record de la distance parcourus en un seul mois sur la planète Mars, était détenu par le rover Opportunity avec un parcourt de 1 415,81 mètres effectué au mois de mars 2005 entre les Sols 396 et 414 de sa mission.

[37] Where is Perseverance?
[38] Perseverance Route Map Archive du Forum UMSF

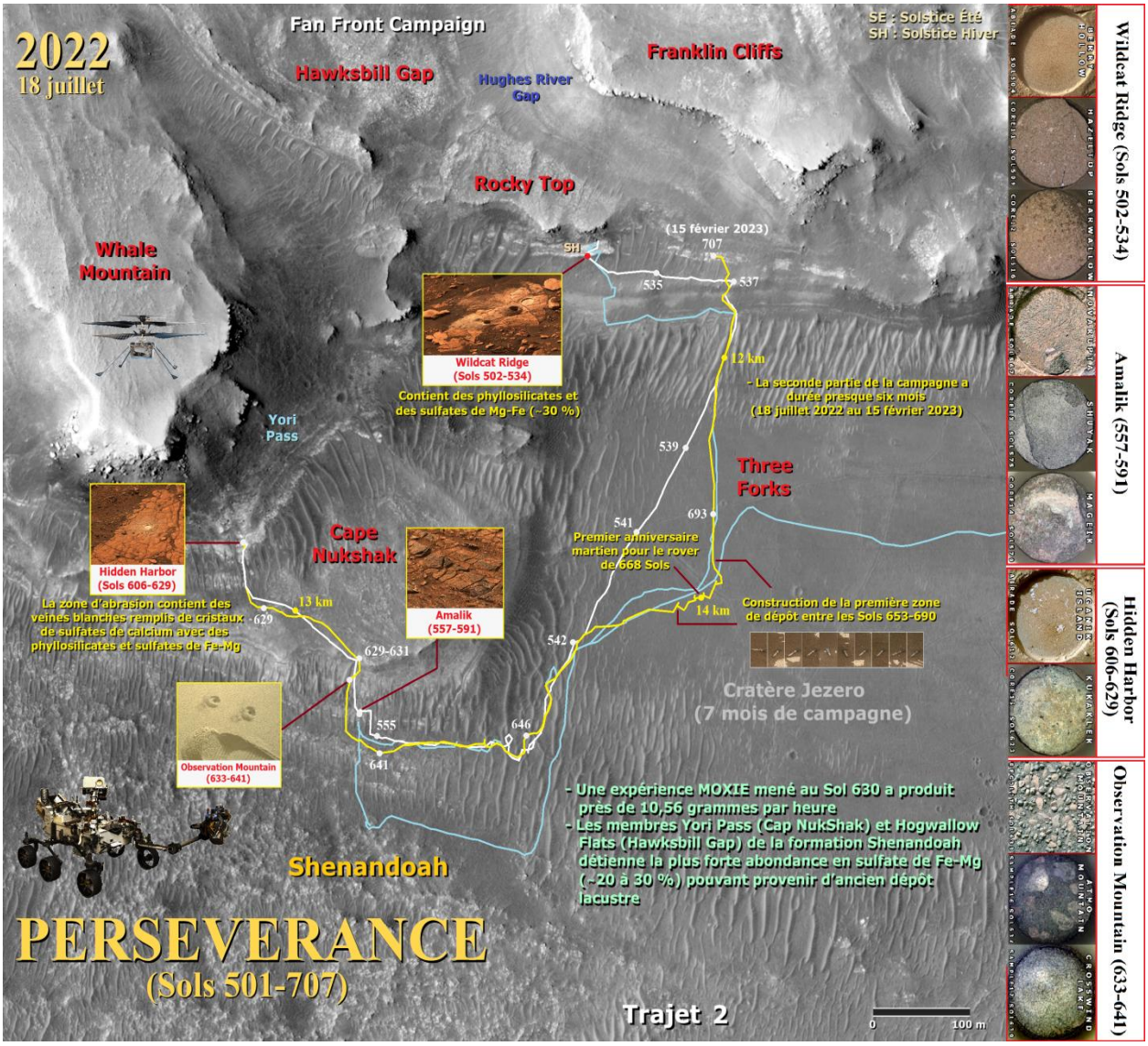


Planche 2 : Suite du trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 501 et 707. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA, et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA et de Phil Stooke pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

Pour facilité le repérage sur les cartes, la zone d'atterrissage a été divisée en quadrangles de 1,2 km sur 1,2 km, chacun recevant un nom informel inspiré d'un parc national ou d'une réserve terrestre (voir la note no 1 en bas de page). Perseverance a exploré la formation de « Shenandoah » (Figure 8) dans deux quadrangles : « Katmai » du nom du parc national et réserve de Katmai situé dans le sud de l'Alaska, et de « Shenandoah » du nom du parc national de Shenandoah dans les montagnes Blue Ridge en Virginie. Pendant que le rover se trouvait respectivement dans chaque quadrilatère, les cibles des différents instruments ont également été nommées d'après les noms de lieux situés à proximités de ces parcs nationaux. Ces noms sont informels et au moment de l'écriture de ce livre ils n'avaient pas encore été reconnus par l'Union astronomique internationale. Mais elles suivent des conventions de dénomination informelles similaires adoptées par la mission du rover Curiosity du programme Mars Science Laboratory(MSL), et des missions précédentes à la surface de Mars.

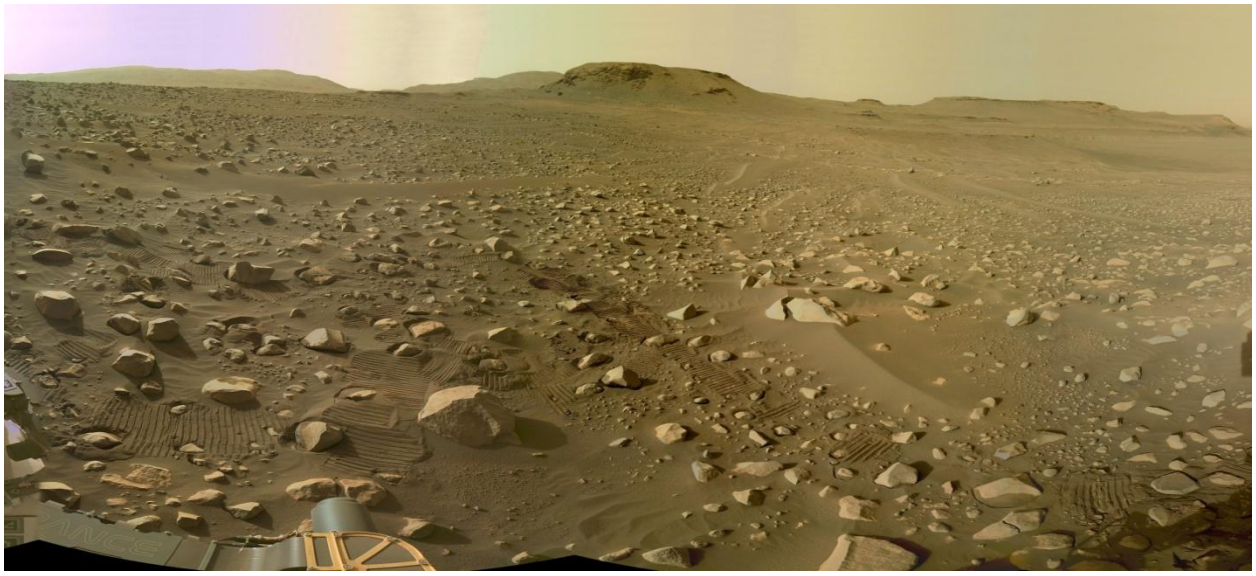


Planche 3 : Panorama couleur de 360° des caméras NavCams pris vers les 14h20 au Sol 419 (25 avril 2022). (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

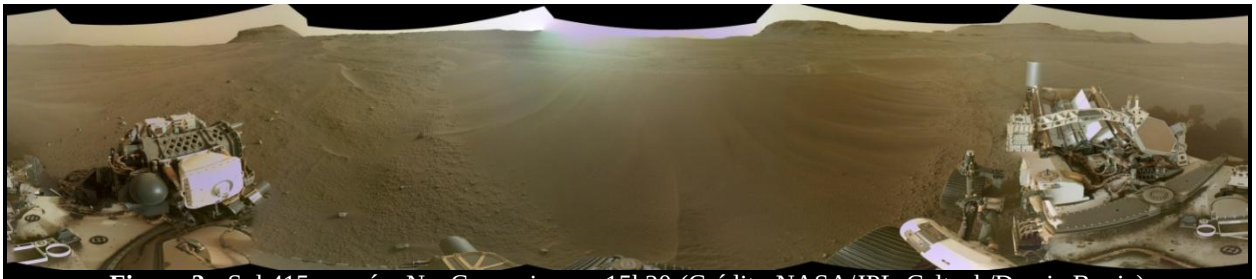


Figure 3 : Sol 415, caméra NavCam pris vers 15h20 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 4 : Sol 416, après avoir parcourus 69,91 mètres, caméra NavCam pris vers 15h50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

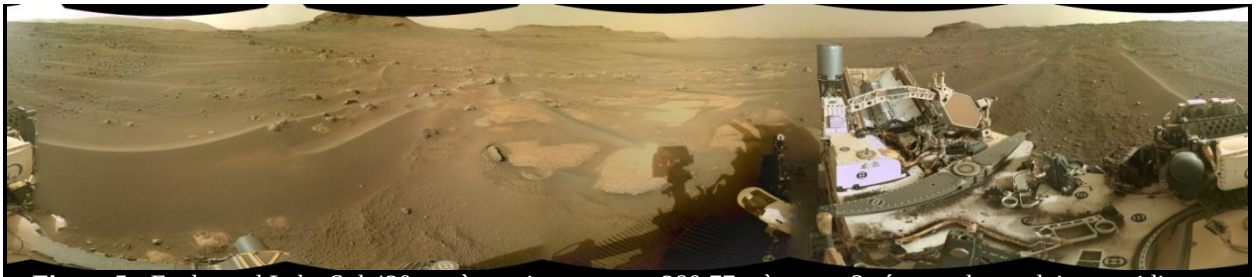


Figure 5 : Enchanted Lake Sol 420, après avoir parcourus 280,77 mètres en 3 séances de conduite quotidienne, caméra NavCam pris vers 15h10 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

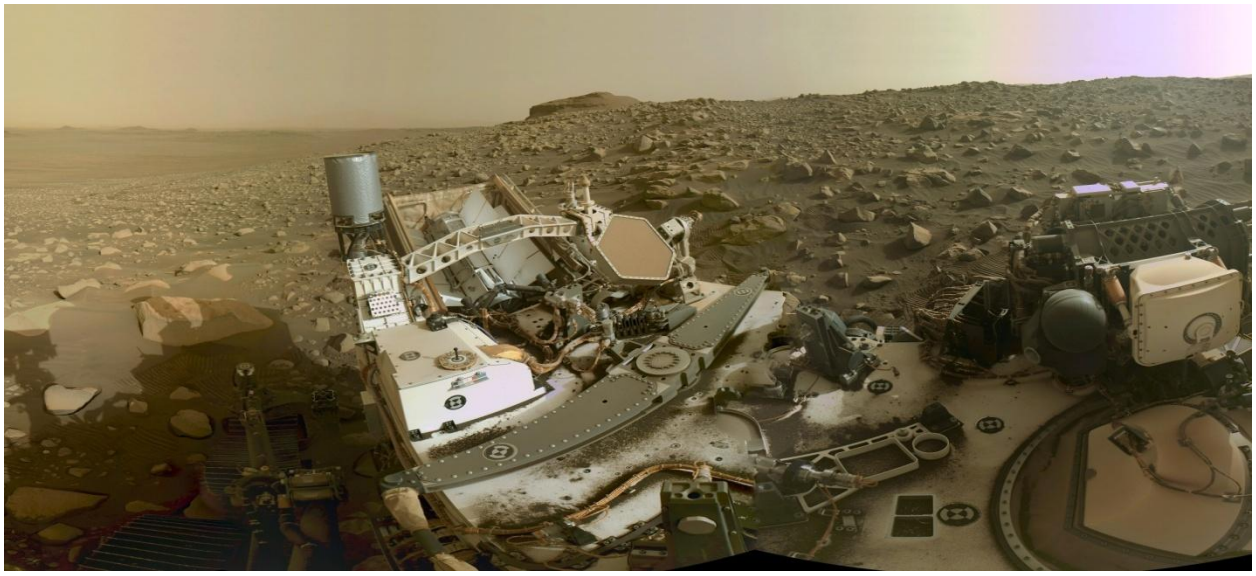


Planche 3 : Suite du ppanorama couleur de 360° des caméras NavCams pris vers les 14h30 au Sol 419 (25 avril 2022). (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

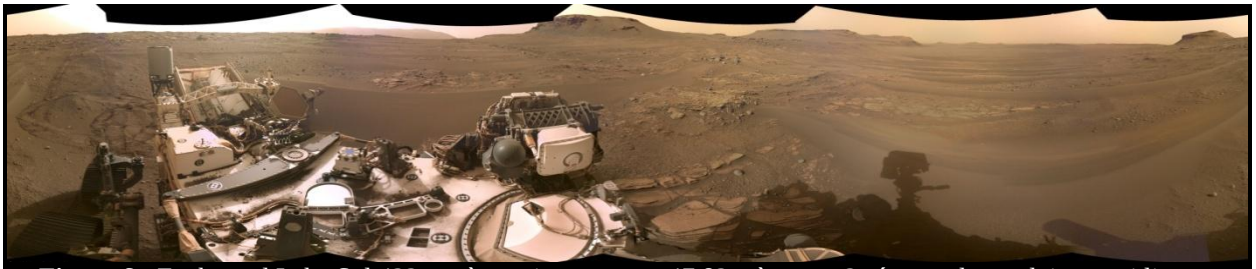


Figure 6 : Enchanted Lake Sol 422, après avoir parcourus 47,82 mètres en 2 séances de conduite quotidienne, caméra NavCam de gauche pris vers 14h12 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

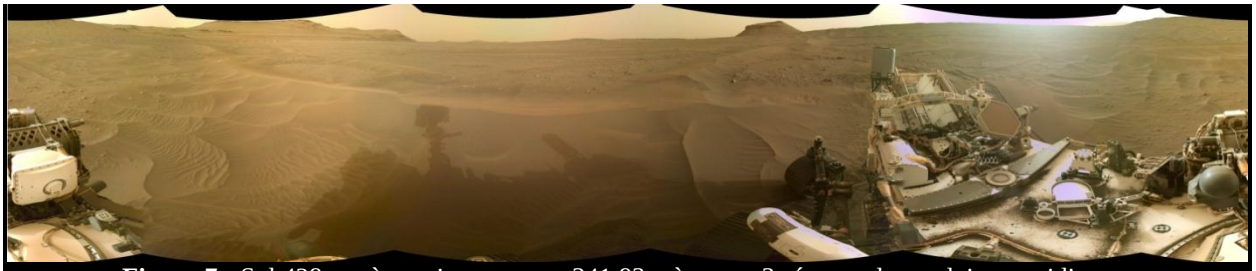


Figure 7 : Sol 428, après avoir parcourus 341,93 mètres en 3 séances de conduite quotidienne, caméra NavCam pris vers 15h26 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Sur le Sol 419 le 25 avril 2022 à la mi-journée vers les 14h20, l'astromobile exécute un nouveau panorama couleur avec ses caméras NavCams (Planche 3). Au centre de l'image de gauche de la planche 3, nous pouvons voir le flanc sud de « Whale Mountain » d'une hauteur d'environ 70 mètres suivit à droite du front sud du delta (« Franklin Cliffs »), et au centre de l'image de droite nous retrouvons le flanc nord de la butte « Kodiak » qui se trouve à environ 220 mètres du rover. Et sur la ligne d'horizon dans la partie gauche de l'image de droite nous retrouvons de droite à gauche les monticules « Isle Royale », « Santa Cruz » et « Mauna Kahalawai ». Le sol est parsemer de cailloux de grosseur moyennes provenant de la retombée de zone d'éjectas (roche errante), qui ont été propulsé dans les airs lors d'impact avec des

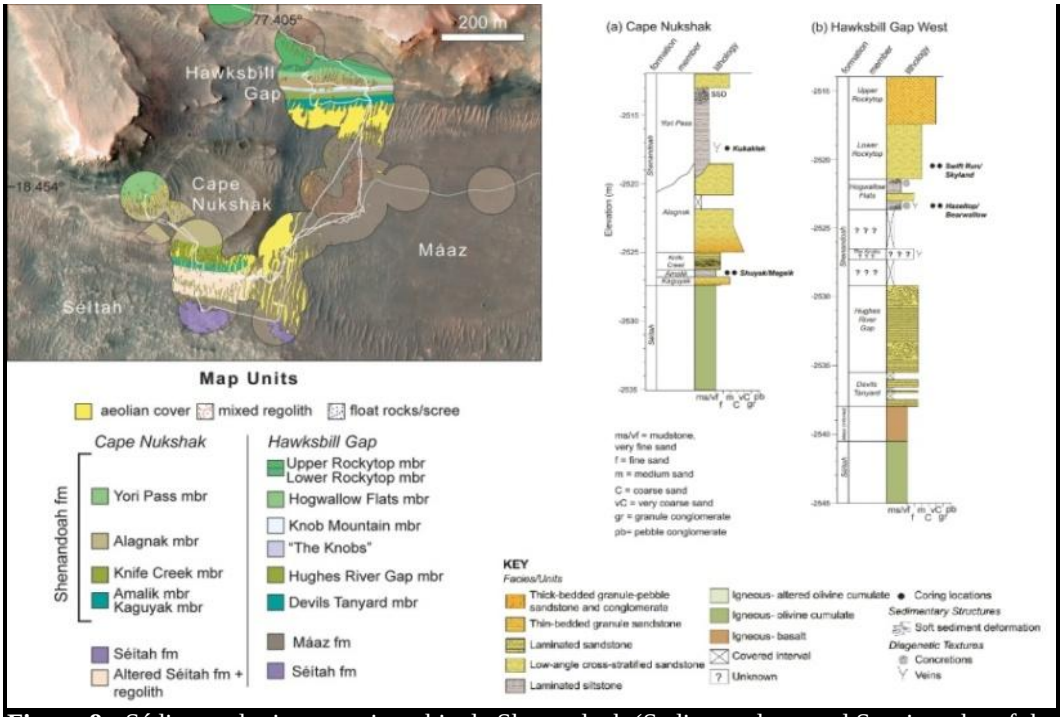


Figure 8 : Sédimentologie et stratigraphie de Shenandoah (Sedimentology and Stratigraphy of the Shenandoah Formation, Western Fan, Jezero Crater, 15 February 2024)

météorites. Certaines de ces roches ce sont fracassées sous l'impact avec d'autres roches, tandis que d'autres ce sont fracturer en plusieurs morceaux sous l'effet du contraste de la dilatation thermique. Plusieurs de ces roches sont visible sur les images panoramiques prises entre les Sols 53 et 86 (planche 5 et 7 du chapitre 2 : Perseverance et Ingenuity Sols 1 à 90). Sur les 43 tubes d'échantillonnage en titane que le rover a amenés sur Mars, 38 sont destinés au prélèvement d'échantillons, et cinq sont des « tubes témoins » conçus pour documenter la propreté de son système d'échantillonnage tout au long de la mission. L'astromobile a déjà utilisé et sceller 11 tubes lors de la phase de la campagne du fond du cratère (Sols 91-379), et qui sont stockées à l'intérieur du ventre du robot. Soit neuf tubes avec échantillons de carottage de sol martien, un tube témoins scellé au Sol 120, et un tube avec échantillon atmosphérique provenant de « Roubion » scellé sur le Sol 164. Il ne reste que 28 tubes pour la collecte d'échantillon et 4 tubes témoins, et vue que la mission est loin d'être terminé et qu'il faut se garder une certaine marge de manœuvre lors de la traversé du front du delta et même au-delà, au cas où se présenterait une occasion pour l'astromobile en cours de route. La récolte de cinq séries d'échantillon prévue dans la zone sédimentaire de la formation « Shenandoah » situé à la base du front du delta, sera déterminée après avoir fait un premier tour de reconnaissance autour des sites « Cape Nukshak » et de « Hawksbill Gap » (Planche 1).

Après avoir parcourus plus de 276,33 mètres à travers le passage « Cannery Passage » en trois séances de roulement quotidien entre les Sols 416 et 420, et exploré différents types de terrain qui compose la région sud de « Cape Nukshak », qui se trouve à la base du flanc sud-est du promontoire rocheux « Whale Mountain », et examinés plusieurs cibles de roches se trouvant sur la couche sédimentaires du site « Enchanted Lake » (lac Enchanté) entre les Sols 422 et 425 (Planche 1). Le robot reprend la route vers l'est au Sol 426 et revient sur ses pas en direction de « Three Forks », dans le but d'aller jeter un œil plus haut sur les possibilités d'échantillonnage

qu'offre « Hawksbill Gap ». Durant la semaine située entre les Sols 422 à 428 (Figure 7), soit du 27 avril au 3 mai 2022, période ou le rover faisait l'étude des affleurements « Kaguyak » et « Amalik ». Les températures mesurées quotidiennement par la station météorologique MEDA, construit par le centre d'astrobiologie de Madrid en Espagne, ont été dans la plage de -14 °C à -24 °C le jour et de -78 °C à -81 °C durant la nuit, et la pression atmosphérique mesurée était de 740,5 à 751,1 Pa (Pascal) avec un soleil se levant vers 5h49 et se couchant vers 17h05. L'astromobile reprend la route au Sol 428 en tournant vers le nord-est, et quatre jours plus tard sur le Sol 432 le 8 mai 2022, le robot franchis le cap de son onzième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars.

Le lendemain sur le Sol 433, le rover prend la direction plein nord en roulant vers le site baptisé « Devil's Tanyard », constitué d'affleurement très fragile et friable, que le rover rejoint sur le Sol 439 après avoir parcourus plus de 324 mètres en quatre séances de conduite quotidienne. Certaines cible de « Devil's Tanyard » montrent une teneur relativement élevée en sulfate de Fe/Mg (~20 %), en serpentine et en carbonate, observé par les instruments PIXL, SuperCam et SHERLOC. Perseverance tourne ensuite vers l'ouest au Sol 441, et le lendemain sur le Sol 442 le robot utilise pour la première fois le logiciel AEGIS (Autonomous Exploration for Gathering Increased Science) de l'instrument SuperCam, qui a sélectionné de manière autonome deux cibles pour le laser dans le cadre d'une expérience LIBS d'analyse chimique élémentaire. Le logiciel AEGIS commence par faire l'analyse des images des caméras de navigation NavCam pour trouver des roches potentiels, et de prioriser celle qui correspond à certains critère déjà programmer dans sa bande de données stockée en mémoire. La sélection pour amorcer une séance d'analyse est en fonction de la taille, de la texture, de la luminosité et de plusieurs autres caractéristiques. L'astromobile lance ensuite une séquence au cours de laquelle SuperCam déclenche son laser pour déterminer la composition chimique d'une ou deux cibles prioritaires qui ont été sélectionnées de manière autonome à partir de la numérisation des images NavCams.

Figure 9 : Roche coincé dans la roue Sol 413 et 449

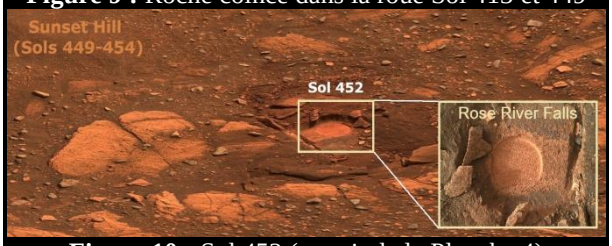


Figure 10 : Sol 452 (extrait de la Planche 4)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le robot reprend la route vers l'ouest sur le Sol suivant (443), et parcourt une distance de 143,41 mètres jusqu'au Sol 449 pour s'arrêter au site dénommé « Sunset Hill », ou le rebot prendra une pause bien méritée le temps d'étudier les environs jusqu'au Sol 454. Une image prise en fin de journée à 15h39 sur le Sol 449 par la caméra d'évitement d'obstacle avant gauche (Front Left HazCam), montre que le passager clandestin resté coincé dans la roue avant gauche au Sol 341 (depuis 108 jours) est toujours là (Figure 9). La cible « Rose River Falls » est abrasé partiellement en fin de journée à 15h25 sur le Sol 452 le 29 mai 2022 (Figure 10, et en bas à droite sur l'image de gauche de la Planche 4). L'action de la perceuse a entrainée la fracturation et l'affaissement de l'affleurement rocheux. Le patch d'abrasion n'a pas pu être finalisé proprement, rendant la surface inutilisable pour les analyses spectroscopiques rapprochées des instruments PIXL et SHERLOC. La NASA a donc classé la cible « Rose River Falls » comme "roche fracturée/inadaptée". Un nouveau panorama couleur (Planche 4) dévoilant le magnifique paysage martien des environs est amorcé

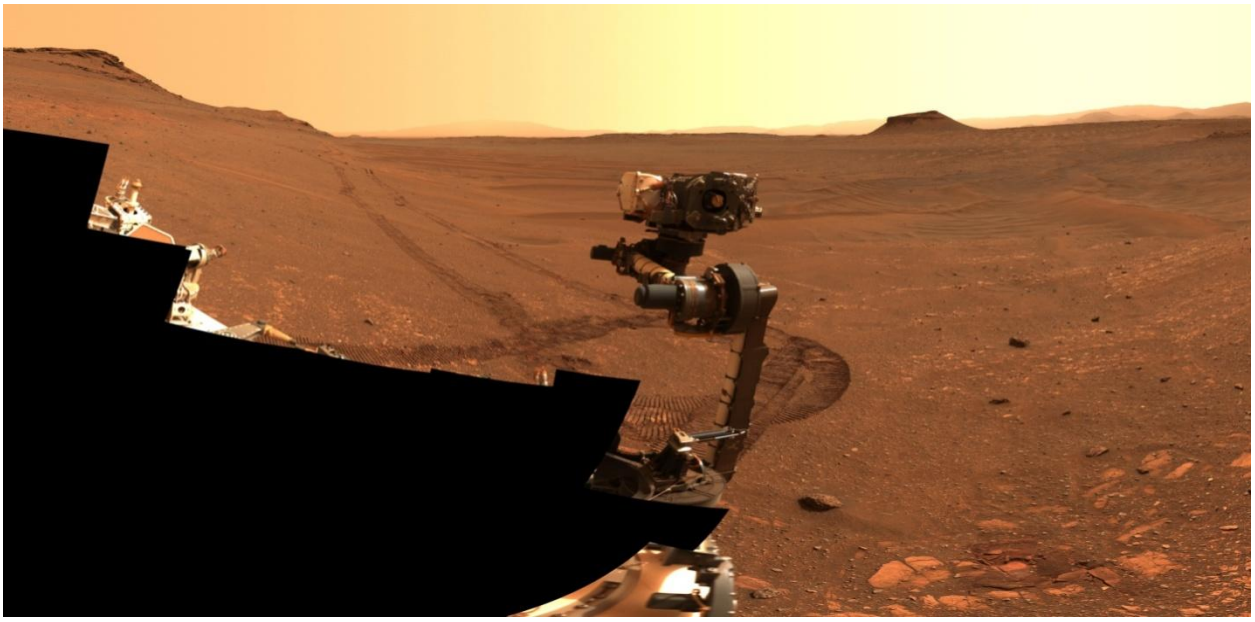


Planche 4 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Rose River Falls au Sol 454 (31 mai 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 11 : Sol 456, caméra NavCam de gauche prise vers 15h20 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

en début de l'après-midi vers les 12h30 au Sol 454 avec les caméras Mastcam-Z, la vue est toujours composée d'un montage de plusieurs centaines d'images. Dans la partie gauche de l'image de gauche de la planche 4, nous pouvons voir le flanc sud du front du delta, et en se dirigeant vers le centre de l'image nous rencontrons la butte « Kodiac ». Le promontoire rocheux « Whale Mountain », qui se trouve au sud de la position du rover, est visible vers le centre de l'image de droite suivit du flanc sud-ouest de « Franklin Cliffs ». L'astromobile reprend la route en direction nord au Sol 455, en navigant entre les petits champs de roche « Boson Knob » et « Kibler Knob ». Et le lendemain vers la fin de journée, le rover exécute un nouveau panorama couleur avec sa caméra de navigation NavCam de gauche composée d'une mosaïque de 20 images (Figure 11).

Après une petite pause de trois jours, Perseverance poursuit sa randonnée en progressant vers le nord entre les Sols 459 et 461, dans le but d'aller rejoindre le site baptisé « Hogwallow Flats » (Appartements Poudlard) qui ressemble à une tranche de bacon (bacon strip). Il s'agit d'une vaste zone de pavée d'affleurement sédimentaire composé de dépôt lacustre (mudstone et grès stratifiés) de 3 à 4 mères d'épaisseur en forme de bande de teinte claire avec des lamelles un peut plus foncée, incluant la détection de veines riche en sulfate de calcium (Ca) et de Fe/Mg (20 à 30 %), de phyllosilicates (20 à 30 %) et de carbonate. La couche sédimentaire de la bande claire émerge à travers les petites ondulations de dunes de régolithe situé au pied du promontoire

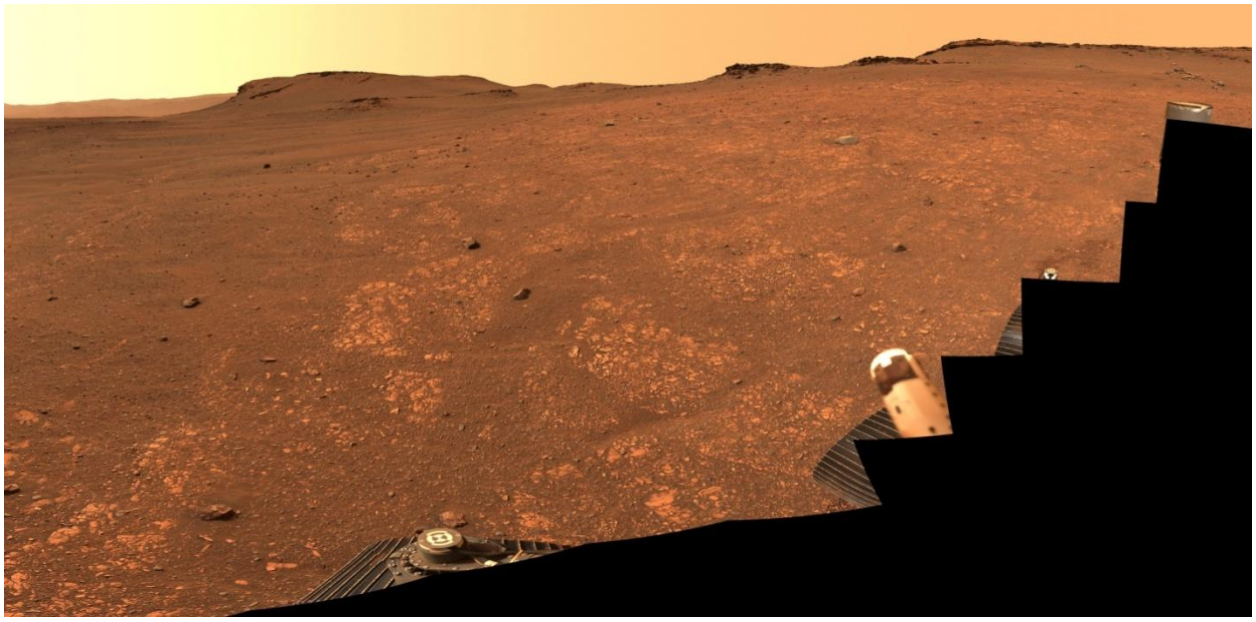


Planche 4 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Rose River Falls au Sol 454 (31 mai 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

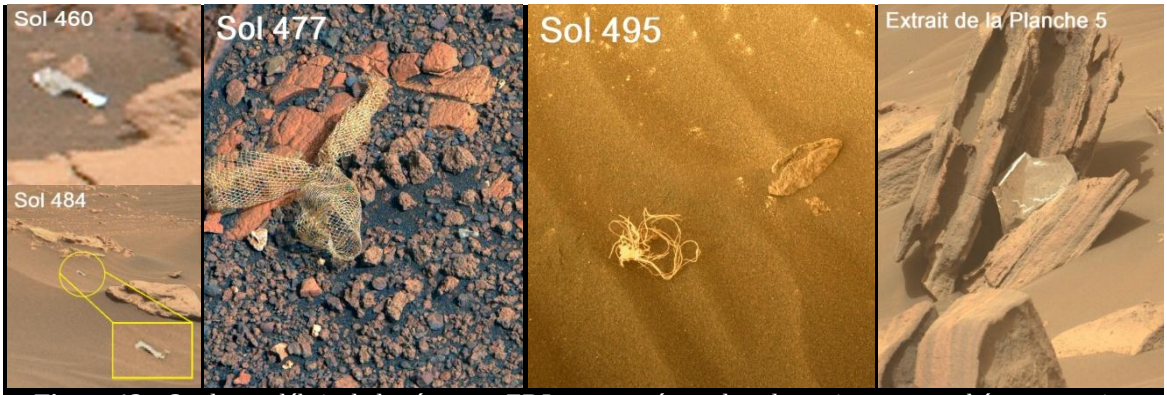


Figure 12 : Quelques débris de la séquence EDL rencontrés sur le sol martien et retouchés par certains membres du forum UMSF (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Membres du Forum UMFS)

rocheux « Rocky Top », et qui s'étendent de manière discontinue sur environ 330 mètres vers l'est. Le promontoire « Rocky Top » se trouve lui-même juste devant l'entrée du passage « Hawksbill Gap », qui donnera accès plus tard au court de la mission à la traversé du sommet du delta du cratère Jezero. Le rover va examiner et étudier les falaises et les environs immédiats du promontoire « Rocky Top », et amorcer plusieurs longues campagnes d'étude et d'analyse sur plusieurs sites d'intérêts scientifiques et géologiques de la région durant près de deux mois et demi (74 jours) entre les Sols 461 et 535, soit du 7 juin au 22 août 2022. Dont les pavées d'affleurements constitué de mudstone laminé et de grès stratifiés des affleurements « Elkwallow Gap » entre les Sols 464 et 473, de « Skinner Ridge » entre les Sols 477 et 500, et de « Wildcat Ridge » entre les Sols 502 et 534.

Durant ce temps, un nouveau panorama couleur de 360° est réalisé à partir d'images capturées par le système de caméra Mastcam-Z (zoom 110 mm), qui dévoile le magnifique paysage montagneux martien se trouvant autour de « Rocky Top » (Planche 5). Il s'agit du panorama paysager le plus détaillé jamais rapporté de Mars jusqu'à maintenant, composé d'une

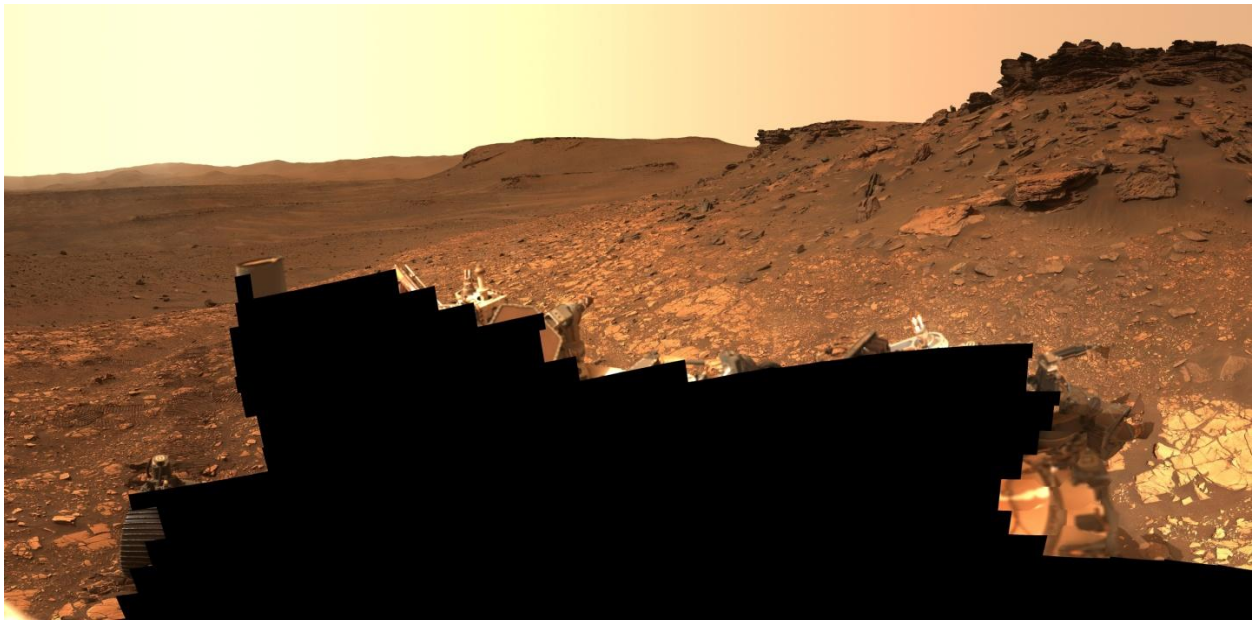


Planche 5 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (zoom 110 mm) du site Rocky Top Scarp aux Sols 466-474 (du 12 au 20 juin 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

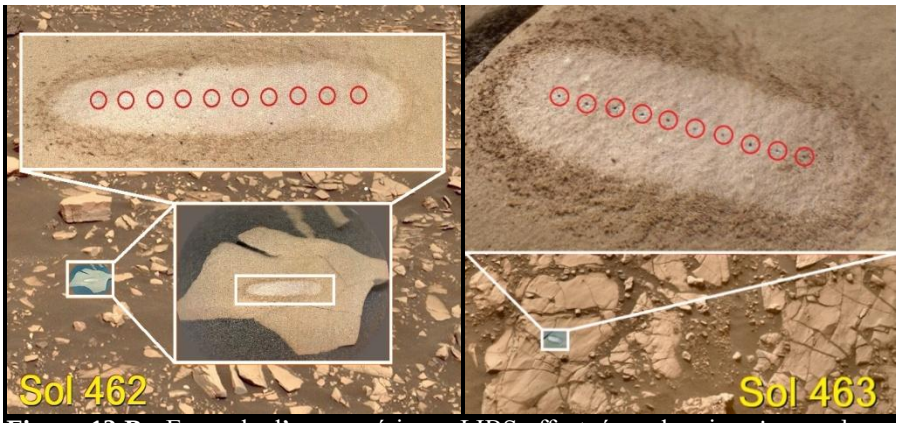


Figure 12 B : Exemple d'une expérience LIBS effectué par le micro-imager laser SuperCam. Le faisceau laser commence par effectuer une séquence de plusieurs tirs dans des points pour dessiner un alignement de dix trous (comme ici au Sol 462 et 463). Le plasma résultant de la vaporisation du matériau de chaque point sous l'impulsion laser, émet de la lumière sous différentes longueur d'onde qui est récupérée par le télescope et analysé par les différents spectromètres de l'appareil. Il s'agit d'image composite qui consiste à assembler et de superposer les images prises par les caméras Mastcam-Z avec celles prises par la Caméra contextuelle de haute résolution (RMI) de SuperCam.
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES/IRAP/Franz Tauber)

mosaïque de 2,5 milliards de pixels qui combine 1 118 images individuelles. Les images ont été prises le 12, 13, 16, 17 et 20 juin 2022 (Sol 466, 467, 470, 471 et 474). Sur certaines images, ont peut voir des débris de matériaux brillants étendue ici et là sur le sol martien. L'un de ses débris provient d'un morceau d'isolant multicouche de Skycrane, qui s'est détacher de l'appareil lors de la séquence d'entrée atmosphérique EDL suivit de la collision avec la surface martienne (Planche 5, et image de droite de la Figure 12). La zone sédimentaire de la bande claire avec rayures plus sombres qui compose « Hogwallow Flats », est nettement visible à la base du promontoire

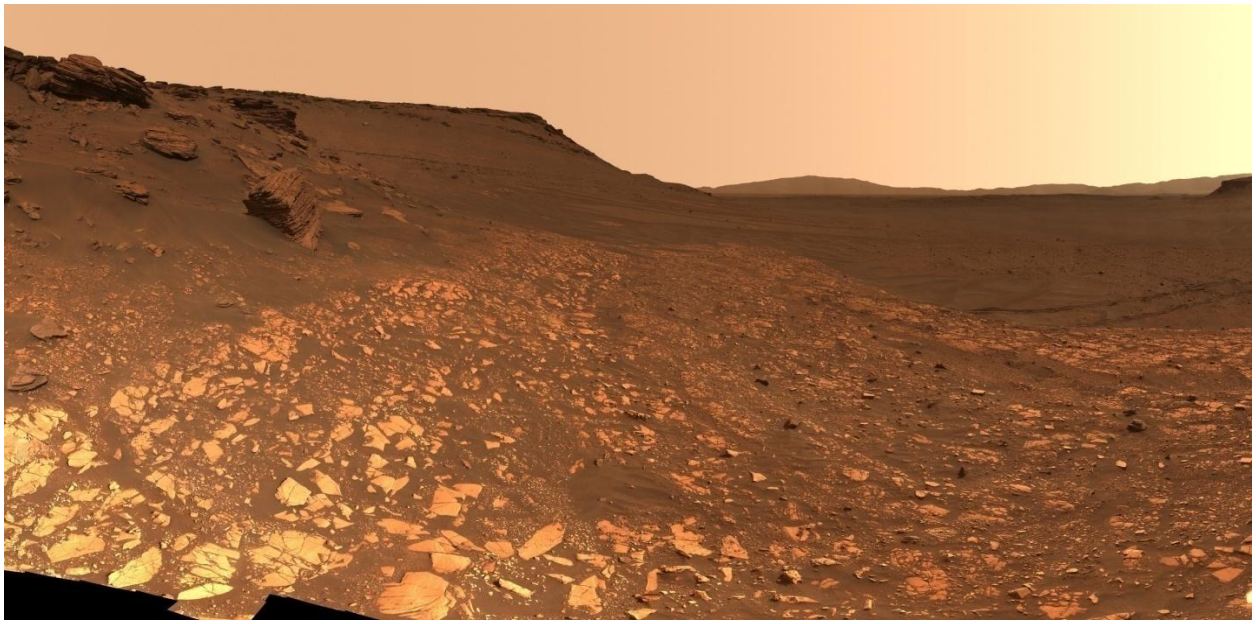


Planche 5 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (zoom 110 mm) du site Rocky Top Scarp aux Sols 466-474 (du 12 au 20 juin 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

rocheux « Rocky Top » sur la planche 5. Un bloc rocheux dénommée « Betty's Rock » est également visible au centre de la partie gauche de l'image de droite, et au centre de l'image de gauche de la planche 6, après que le robot est effectué un court déplacement de 12,58 mètres au Sol 477. Il s'agit d'un bloc rocheux qui c'est détaché du haut de la falaise « Rocky Top ».

Figure 13 : Elkwallow Gap aux Sols 471 et 473 (Crédit : NASA/JPL-Caltech & ASU)

La vaste campagne menée sur la bande sédimentaire de teinte clair du site « Hogwallow Flats », débute par la première tentative d'abrasion d'une cible de roche se trouvant sur le pavé d'affleurement « Elkwallow Gap ». La séance d'abrasion est effectuée au début de l'après-midi vers 12h54 au Sol 471 le 18 juin 2022, mais l'opération se déroule mal durant l'abrasion. La roche s'est déplacée et c'est fissuré sous l'action de la perceuse (Figure 13), ce qui la rend impropre au carottage d'échantillonnage. Les roches déplacées ou fracturées lors d'une séance d'abrasion, deviennent trop instables et imprévisibles pour la sécurité des instruments scientifiques très fragiles de la tourelle. Par exemple, lors du positionnement et de la mise en place près d'une cible à analyser, la roche pourrait bouger et endommager l'instrument utilisé. Dans le cas d'une séance de carottage, si la roche n'est pas stable le foret de la perceuse pourrait rester coincé si la roche bouge trop lors du forage. Le résultat de l'activité de l'abrasion sur la cible « Elkwallow Gap » est visible sur le premier affleurement rocheux de teinte claire situé à l'extrême gauche de l'image de droite de la planche 5. Il s'agit de la deuxième séance d'abrasion consécutive qui a ratés, la première étant la tentative effectuée précédemment à « Rose River Falls ». Les affleurements rocheux qui compose la couche sédimentaire de « Hogwallow Flats » semblent êtres trop fragiles et trop friables, par conséquence la vitesse de percussion de la perceuse à été diminuée. Après les premières tentatives échouées, le rover se déplace d'une

Planche 6 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Skinner Ridge au Sol 484-492 (du 1er au 19 juillet 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

dizaine de mètres plus haut en contournant par la droite la roche « Betty's Rock », qui passe ainsi de l'image de droite sur la planche 5 à l'image de gauche sur le panorama de la planche 6 juste à côté du rover. Le but est de rejoindre le site d'intérêt géologique dénommé « Skinner Ridge » situé sur un affleurement rocheux étendu à la base de la pente du promontoire « Rocky Top ». L'astromobile va rester stationné plus d'un mois entre les Sols 477 et 500 du 23 juin au 17 juillet 2022, le temps d'étudier le terrain au alentour, et pour exécuter les premières séances de carottage et de collecte d'échantillon réussit dans la formation « Shenandoah ».

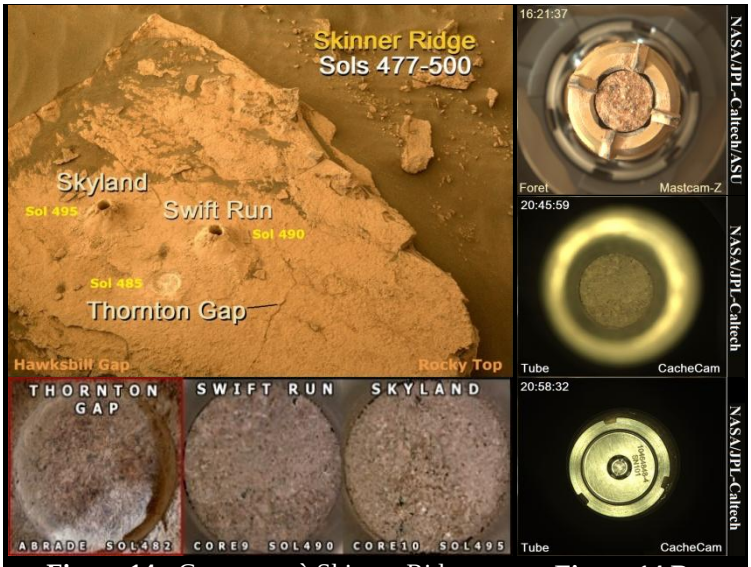


Figure 14 : Campagne à Skinner Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU & Paul H.)

Figure 14 B : Validation Sol 490

Une semaine plus tard, un nouveau panorama couleur de 360° est réalisé à partir d'images capturées par le système de caméra Mastcam-Z (zoom 34 mm) entre les Sols 484 et 492 du 1er au 19 juillet 2022 (Planche 6). Le panorama dévoile le magnifique paysage montagneux martien qui se trouve autour de l'escarpement rocheux « Rocky Top » et de l'affleurement « Skinner Ridge » (visible dans la partie inférieur droite de l'image de gauche de la planche 6). Sur les différentes images ont peut constater les dégâts fait par l'érosion éolienne qui ronge petit à petit les parois abrupte de « Rocky Top » d'une dizaine de mètres de haut. Les roches sédimentaires qui composent les parois de

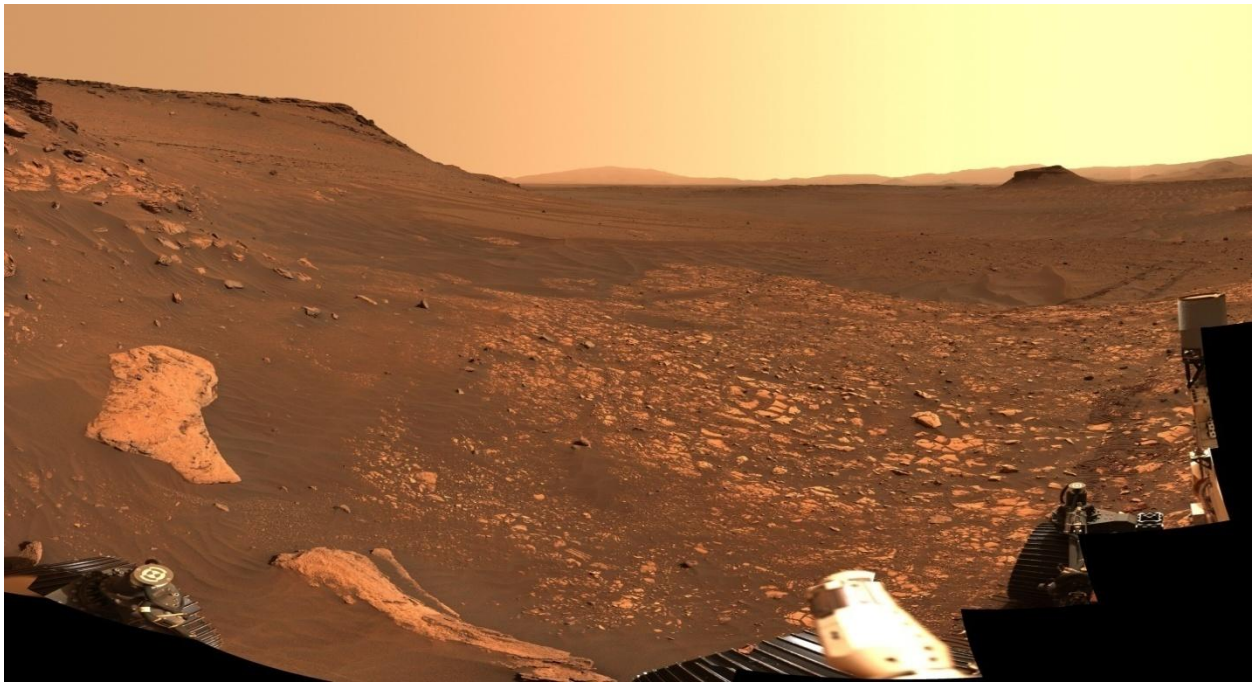


Planche 6 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Skinner Ridge au Sol 484-492 (du 1er au 19 juillet 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

« Rocky Top » sont tranquillement dégradées avec le temps, et à l'occasion des morceaux finisses par tomber des parois et de débouler entre contrebas comme la roche « Betty's Rock ». La cible de roche baptisée « Thornton Gap » située sur l'affleurement « Skinner Ridge » est abrasée et nettoyés sur le Sol 485 le 2 juillet 2022 (Figure 14). La nouvelle méthode de forage employée, qui consiste a creusée la roche plus en douceur a réussi, révélant la surface interne de la roche sans avoir fracturé la zone environnante. Après l'étude et l'analyse de la zone abrasée de « Thornton Gap », dont les instruments ont détectée une abondance à la hauteur de 10 % de carbonate de Fe/Mg. Une paire d'échantillons est ensuite récoltée dans la roche durant la semaine suivante. La première campagne de forage et de carottage est effectuée sur la cible baptisée « Swift Run » en fin de l'après-midi vers les 16h21 au Sol 490 le 7 juillet. L'échantillon contenu dans le tube à une longueur de 6,69 cm, ce qui en fait le noyau le plus long de la mission jusqu'à présent. Le tube no 186 est ensuite scellé hermétiquement en milieu de soirée à 21h23 (Figure 14 B). Les données recueillis lors du forage ont montré que la roche était l'une des plus tendres à creuser jusqu'à présent, il a suffit d'un faible niveau de percussion pour progresser dans la roche, désactivant parfois complètement la percussion lorsque le forage rotatif seul était suffisant. Un second échantillon de carottage est récolté sur la cible « Skyland » à la fin de l'après-midi vers les 16h15 au Sol 495, puis le tube no 272 est scellé hermétiquement vers la fin de soirée à 21h22. Un deuxième tube témoins (le no 205) conçus pour enregistrer l'état de contamination est scellé au Sol 499 le 16 juillet 2022 à 20h14.

Le robot se déplace ensuite vers le sud-ouest sur une courte distance de 23,41 mètres au Sol 501 et 502, dans le but d'aller rejoindre un nouveau site d'échantillonnage potentiel baptisé « Wildcat Ridge » (Planche 2). Le rover Perseverance restera stationné durant plus d'un mois pour étudier et analyser les environs, et de mener à bien une autre campagne de carottage et de collecte d'échantillon entre les Sols 502 et 534 du 19 juillet au 21 août 2022 (Figure 15). La cible de roche dénommé « Berry Hollow » qui se trouve sur l'affleurement rocheux « Wildcat Ridge »

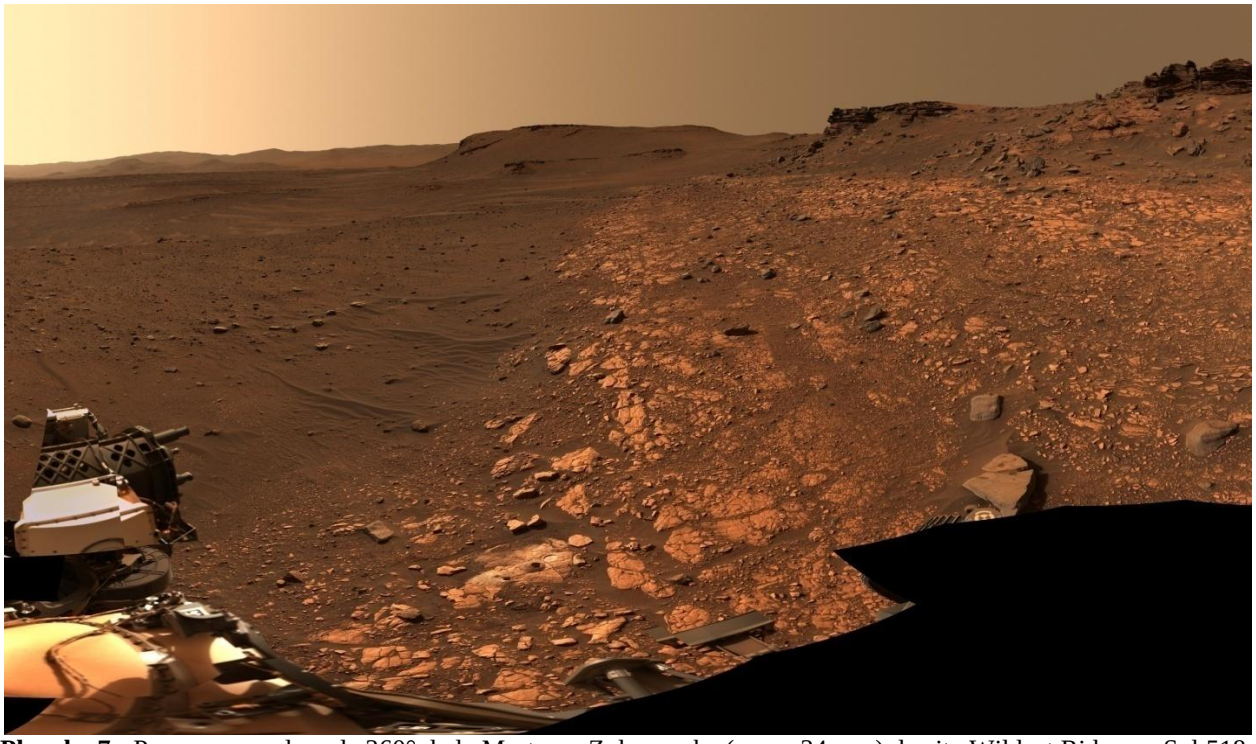


Planche 7 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Wildcat Ridge au Sol 518-534 (du 5 au 21 août 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

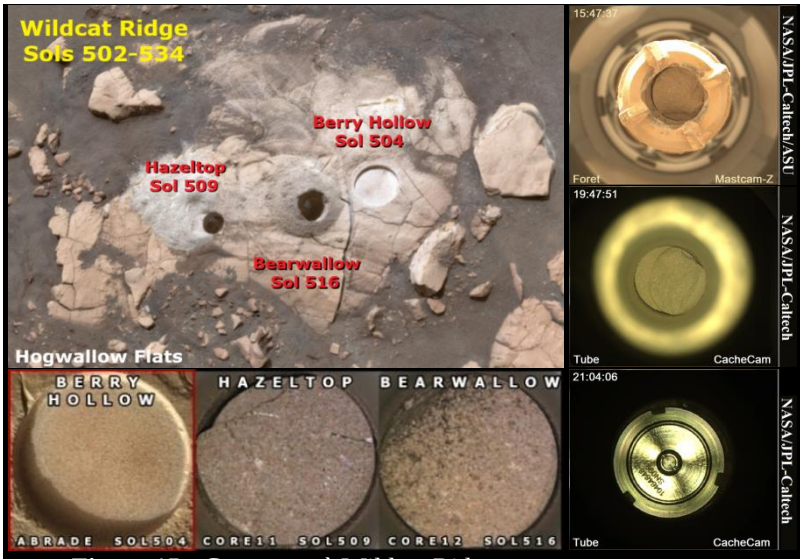


Figure 15 : Campagne à Wildcat Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 15 B : Validation Sol 509

d'environ 0,4 mère de diamètre, est abrasé puis sa surface est nettoyé en fin de journée vers les 17h31 au Sol 504, soit la veille avant l'arrivé du solstice d'hiver dans l'hémisphère nord de la planète Mars le 22 juillet 2022 (Sol 505). La première analyse in situ effectuée par les différents instruments de Perseverance, semble indiqué que la zone d'abrasion contient des phyllosilicates et des sulfates de Mg-Fe (30%), pouvant résulter d'un dépôt sédimentaire de faible énergie qui proviendrait d'un lac hyper salin. Le premier carottage baptisé « Hazeltop » est effectué plus bas en dessous de « Berry Hollow » en fin de l'après-midi vers 15h42 au Sol 509, puis le tube no 172 est scellé hermétiquement en milieu de soirée à 20h57 (Figure 15 B). La deuxième cible de carottage sur l'affleurement « Wildcat Ridge » dénommé « Bearwallow » est forée au-dessus de « Hazeltop » une semaine plus tard vers la fin de l'après-midi à 15h00 sur le Sol 516 le 3 août 2022, puis le tube no 259 est scellé hermétiquement en milieu de soirée à 20h27 et acheminé vers son espace de stockage. Entre les Sols 518 et 534 du 5 au 21 août 2022, Perseverance prend une nouvelle vue panoramique couleur de 360° des

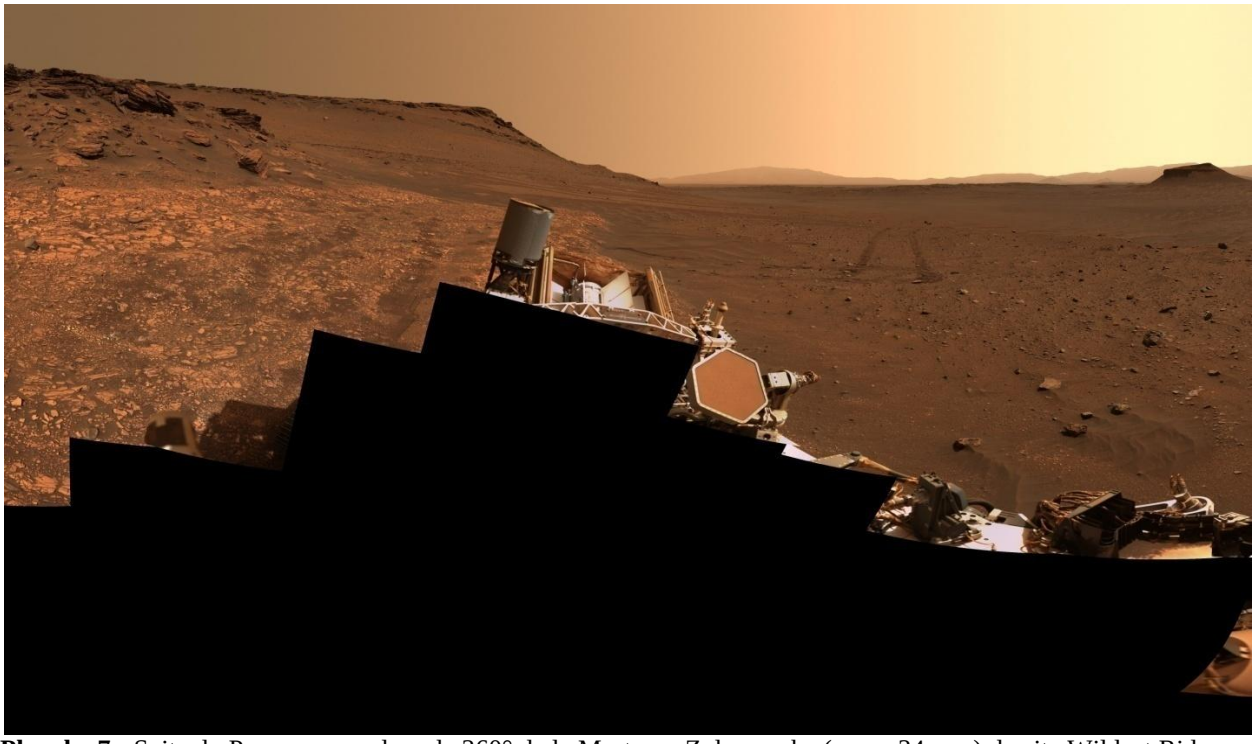


Planche 7 : Suite du Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Wildcat Ridge au Sol 518-534 (du 5 au 21 août 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 16 A-B : Exemple de roches étrange croisées le long du trajet à Rocky Top (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/F. Tauber & MSSS/ASU/NeV-T)

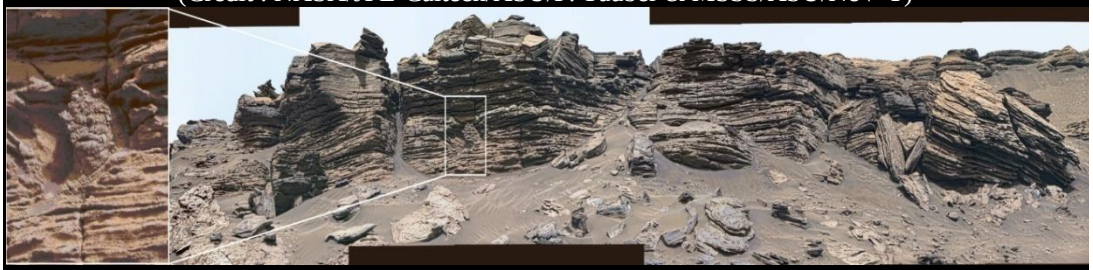


Figure 16 C : Sol 507 Rocky Top (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU/NeV-T & F. Tauber)

lieux avec sa caméra Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm), dévoilant ainsi le magnifique paysage martien qui se trouve au alentour de « Wildcat Ridge » (Planche 7). L'astromobile repend la route vers l'est et parcourt une distance de 173,79 mètres en trois séances de roulement

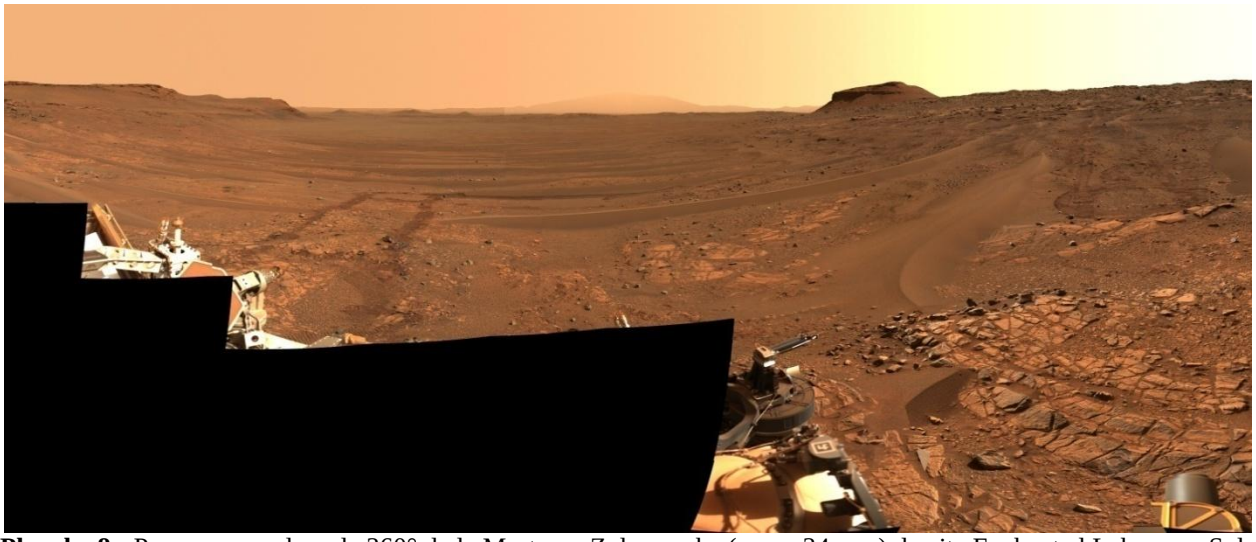


Planche 8 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Enchanted Lakes aux Sols 566-586 (23 septembre au 13 octobre 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

quotidien entre les Sols 535 et 537. Perseverance tourne ensuite vers le sud-ouest au Sol 538, dans le but de retourner à nouveau vers l'affleurement « Enchanted Lake » qui se trouve au sud de « Cap Nukshak », pour y rechercher de nouveaux sites à échantillonner. En six séances de conduite quotidienne, effectué en dix jours entre les Sols 538 et 548 du 25 au 4 septembre 2022. Le robot a parcourus une distance de plus de 590,08 mètres, et franchit dès le départ sur le Sol 538 le cap de son douzième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Après une pause d'une semaine, le rover reprend la route vers l'ouest en direction de « Enchanted Lake » et de l'affleurement « Amalik » en parcourant une distance supplémentaire de 264,51 mètres entre les Sols 555 et 556. Perseverance va rester plus d'un mois dans la zone de l'affleurement « Amalik » entre les Sols 557 et 591 du 14 septembre au 19 octobre 2022.

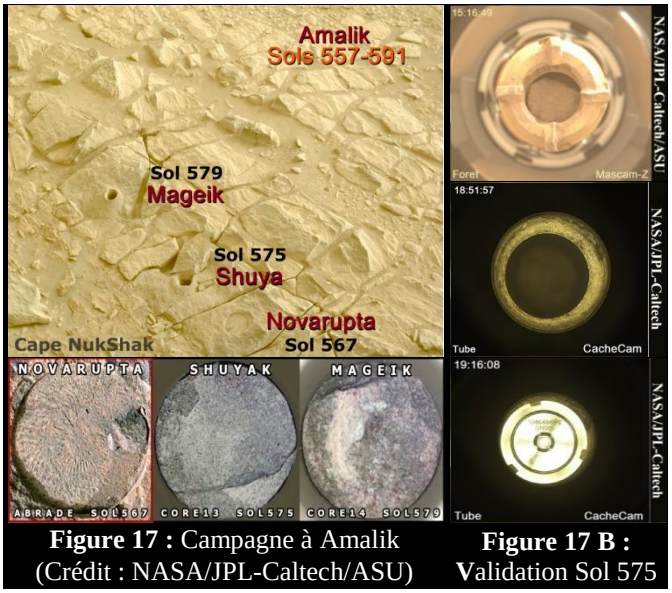


Figure 17 : Campagne à Amalik (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 17 B : Validation Sol 575

Après l'échec de la première tentative d'abrasion de la cible rocheuse « Chiniak » au Sol 558 (Figure 18 B), la roche très fragile c'est casée en morceaux sous l'action de la perceuse. L'astromobile se déplace quelque peut sur le Sol suivant pour rejoindre l'espace de travail « Raspberry Island ». Et entre les Sols 566 et 586 du 23 septembre au 13 octobre 2022, l'astromobile prépare une nouvelle vue panoramique couleur de 360° (Planche 8) des environs avec sa caméra Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm). La vue dévoile le magnifique paysage martien donnant sur la zone « Enchanted Lake » et de l'affleurement « Amalik », que l'on peut voir en bas dans la partie droite de l'image de gauche, avec « Kodiak » juste en haut. Le flanc sud-est de « Whale Mountain » est dans la partie droite de l'image de droite, et en dessous nous

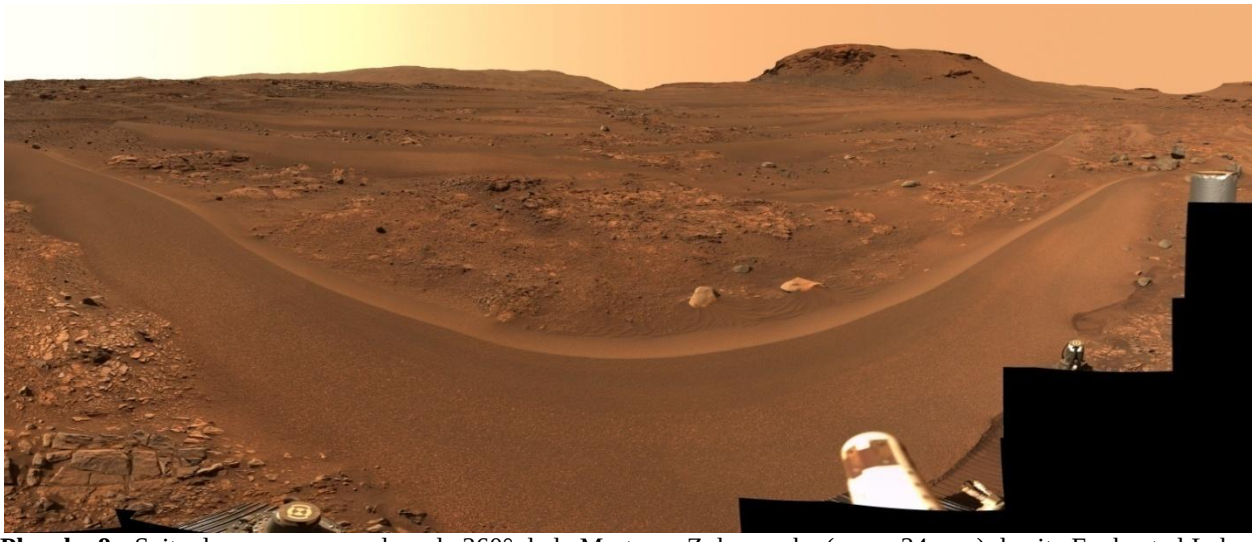


Planche 8 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Enchanted Lakes aux Sols 566-586 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

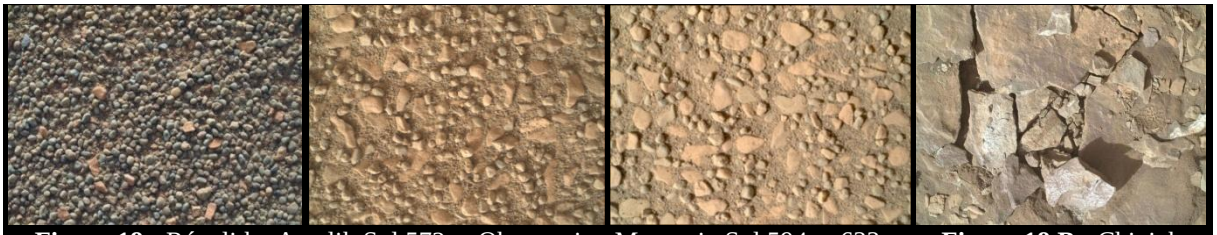


Figure 18 : Régolithe Amalik Sol 572 et Observation Mountain Sol 594 et 633 **Figure 18 B :** Chiniak
(Crédit : NASA/JPL-Caltech & ASU)

retrouvons l'ondulation éolienne « Observation Mountain » (Planche 8). Une deuxième cible de roche baptisée « Novarupta » a été sélectionnée trois jours plus tard, pour une séance d'abrasion et du nettoyage de sa surface en fin de l'après-midi vers 17h00 au Sol 567 le 24 septembre 2022 (Figure 17). Après l'étude et l'analyse de la zone d'abrasion, qui semble indiquer une origine sédimentaire provenant d'un cône alluvial, un échantillon de carottage est récolté sur la cible dénommée « Shuyak » en fin de journée vers les 15h16 au Sol 575 le 2 octobre 2022, puis le quatorzième tube (no 264) d'échantillon est scellé hermétiquement en début de soirée à 19h40. Un deuxième forage pour recueillir la deuxième paire d'échantillon sur l'affleurement« Amalik », est effectué sur la cible « Mageik » en fin de journée vers 15h30 sur le Sol 579 le 6 octobre

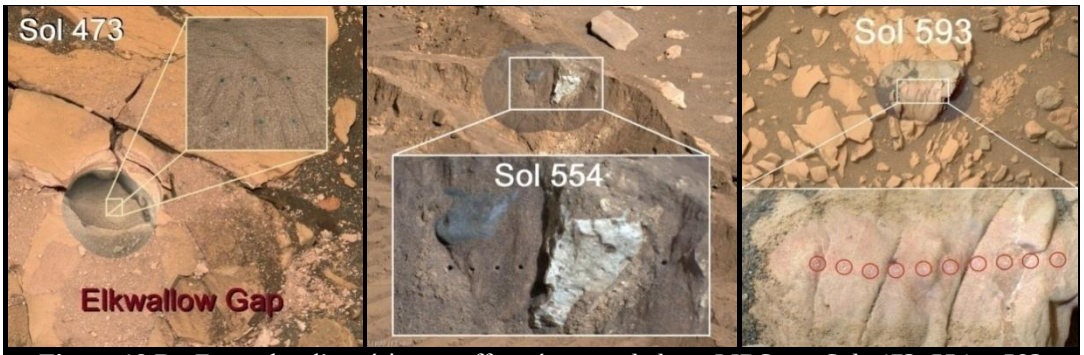


Figure 18 B : Exemples d'expériences effectuées avec le laser LIBS aux Sols 473, 554 et 593
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES/IRAP/Franz Tauber)

Planche 9 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) du site Hidden Harbor aux Sols 614-619 (du 11 au 16 novembre 2022) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

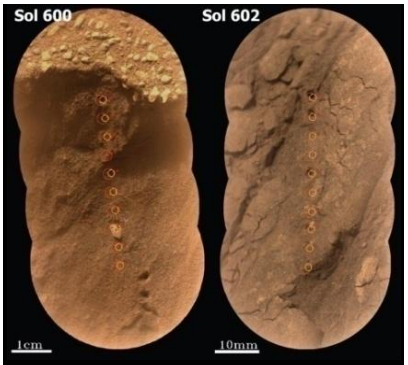


Figure 18 C : Fultons Falls et Funnel Creek, Expérience LIBS[39] (NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES/IRAP)

2022. Après avoir rencontré certaine difficulté (le sceau destiné à boucher le tube ne s'est pas détaché comme prévu du distributeur), le tube no 184 sera finalement nettoyé et scellé hermétiquement plus tard au court de la mission sur le Sol 619 (à 19h53 le 16 novembre). Entre temps, un troisième tube témoins (no 188) est scellé en début de soirée à 18h52 sur le Sol 586 le 14 octobre 2022. L'astromobile reprend la route vers le nord au Sol 592, et après une pause de douze jours pour étudier des cibles de sol (régolithe) qui se trouve sur l'ondulation de la dune « Observation Mountain » (Sol 593-605) (Figure 18, 18:B:c et 18:C). Le robot repart vers le nord-est au Sol 606 en direction de « Yori Pass », vers une zone de terrain situé au nord de « Cap Nukshak » et au sud-ouest du promontoire rocheux « Whale Mountain ». L'objectif est de rejoindre l'affleurement « Hidden Harbor » d'environ 5 mères de diamètre, pour l'étudier durant les trois semaines suivante entre les Sols 606 et 629 du 3 au 27 novembre 2022. Et lors du dernier parcourt le robot a franchit le cap du treizième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars.

Une séance d'abrasion et de nettoyage est ensuite programmée sur la cible dénommée « Uganik Island » de l'affleurement « Hidden Harbour » (Figure 19) en fin de l'après-midi vers 15h30 au Sol 612 le 9 novembre 2022. La zone d'abrasion contient des veines blanches nettement visibles de 1 à 2 mm d'épaisseur sur environ 12 mm de longueur remplies de cristaux de sulfate de calcium (Ca), avec des phyllosilicates et des sulfates de Fe-Mg[40]. Entre les Sols 614

[39] Mars 2020 Initial Reports Volume 2, Delta Front Campaign February 15, 2023, Page 20-32
[40] Depositional and Diagenetic Sulfates of Hogwallow Flats and Yori Pass, Jezero Crater: 06 February 2024

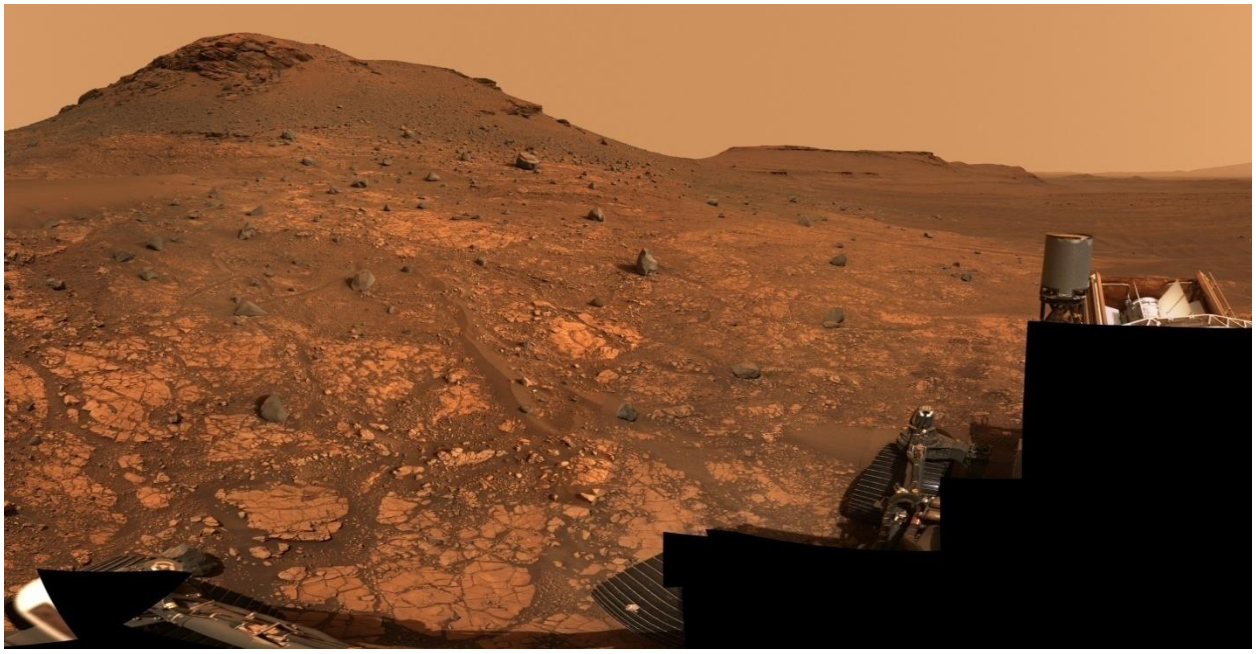


Planche 9 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) du site Hidden Harbor aux Sols 614-619 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

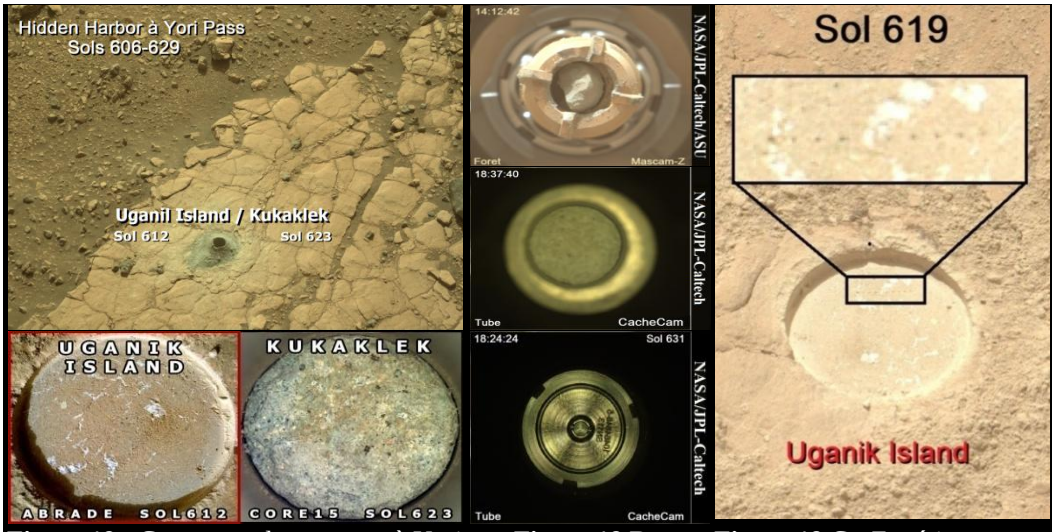


Figure 19 : Campagne de carottage à Yori Pass sur l'affleurement Hidden Harbor **Figure 19 B :** **V**alidation Sol 626-31 **Figure 19 C :** Expérience avec le Laser LIBS au Sol 616 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

et 619 du 11 au 17 novembre 2022, l'astromobile entame une nouvelle vue panoramique couleur de 360° des environs avec sa caméra Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm). La vue panoramique de la planche 9 dévoile le magnifique paysage martien donnant sur les environs de l'affleurement « Hidden Harbor », avec en arrière plan la colline « Kodiak » qui se trouve au loin dans la partie gauche de l'image de gauche, le patch d'abrasion « Uganik Island » se trouve en bas à droite, suivit dans l'image de droite du flanc sud-est de « Whale Mountain » et au loin par le flanc sud du front du delta du cratère Jazero (Planche 9). Le spectromètre d'ablation laser à fluorescence X (PIXL) va étudier à trois reprises le matériau de « Uganik Island » au Sol 614, 617 et 618. Les spectromètres Raman et de fluorescence UV de l'instrument SHERLOC sont mis à contribution,

pour faire l'étude des différentes taches de la zone abrasée sur les Sols 614, 617, 618 et 620. Les balayages des Sols 614, 618 et 620 ont ciblé un grand cristal blanc, tandis que le balayage du Sol 617 a ciblé une caractéristique de teinte beige. La zone abrasée a subit plusieurs expérience avec le laser LIBS du micro-imager laser SuperCam aux Sols 611, 613, 619 et 620. Une expérience LIBS est effectuée directement avec des tirs laser dans la partie claire de la tache d'abrasion au Sol 619 le 17 novembre 2022[41] (Figure 19 C). Chaque patch d'abrasion des sites de carottage sélectionné, ont subies une batterie de mesure et d'analyse incluant différentes expériences avec le laser LIBS. Le faisceau laser dessine un motif d'alignement composée de dix troues qui passe à travers les traces plus claire de dépôts, chaque troues est le résultat de plusieurs dizaines de tirs laser. À « Yori Pass », Perseverance va collecter qu'un seul échantillon baptisé « Kukaklek » effectué directement à travers la zone d'abrasion « Uganik Island », afin de cibler directement les veines de sulfate. Le carottage est effectué au milieu de l'après-midi vers 14h12 au Sol 623 le 21 novembre 2022, et suite à plusieurs tentatives infructueuses de pose du joint d'étanchéité pour le tube no 242, ce dernier a été scellé hermétiquement cinq jours plus tard à l'aide d'un joint différent en début de soirée à 18h16 au Sol 631 le 29 novembre.

Les membres « Yori Pass » (« Cape NukShak ») et « Hogwallow Flats »[42] situé plus haut à « Hawksbill Gap » à la mi-hauteur de l'épaisseur de la formation « Shenandoah », détienne la plus une forte abondance en sulfate de Fe-Mg (~20–30%) pouvant provenir d'ancien dépôt sédimentaire lacustre. Entre temps, l'astromobile observe deux nouveaux transites solaires de Phobos, soit une au milieu de l'après-midi au Sol 621 entre 13h51 et 13h56, et la deuxième au Sol 628 en début de soirée entre 17h32 et 17h37. Le robot reprend la route vers le sud-est le lendemain en parcourant une distance de 205,56 mètres. Une nouvelle expérience avec MOXIE (the Mars Oxygen In Situ Resource Utilization Experiment), dont l'objectif est d'extraire de l'oxygène de l'atmosphère de Mars, est menée au Sol 630 le 28 novembre 2022. L'instrument a réussi à battre à nouveau le record avec la production de près de 10,56 grammes par heure au maximum. L'ancien record avait été obtenu sur le Sol 534 (22 août 2022) avec un pic de production d'oxygène de 10,44 grammes par heure. MOXIE utilise un processus électrochimique à très haute température (800 °C) appelé électrolyse des oxydes solides, qui sépare les ions oxygène de chaque molécule de dioxyde de carbone pompée et compressée depuis la fine atmosphère de Mars. Il y a deux petits ports de sortie de gaz sur MOXIE : un par où s'écoule l'oxygène moléculaire et un autre par où sort un mélange de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone n'ayant pas réagi.

Le rover franchit ensuite une petite distance de 23,33 mères au Sol 632, pour rejoindre l'ondulation éolienne dénommée « Observation Mountain » (dune ou crête éolienne de régolithe transversale TAR) d'un mètre de haut (Figure 20). Tous les instruments du rover sont mis à contribution pour aider à sélectionner les prochaines cibles sur les dunes. Les caméras HazCams, NavCams et Mastcam-Z ont fourni des images qui ont aidé à choisir les cibles sur l'ondulation ciblé. SuperCam et SHERLOC ont utilisé leurs spectromètres laser UV pour évaluer la minéralogie du régolithe dans l'espace de travail, et PIXL a interrogé la composition élémentaire des fragments de roche grâce au rayonnement X. Une paire d'échantillons de régolithe a été récoltés sur la cible « Atmo Mountain » en fin d'après-midi à 16h28 au Sol 634, puis le tube no 059 est scellé hermétiquement en fin de soirée à 22h16. Un deuxième échantillon de régolithe est

[41] Mars 2020 initial reports Volumee 2 (Samples 11-21), Posted March 15, 2023 Modified October 25, 2023
[42] In Situ Carbonation of Sedimentary and Igneous Rocks of Ultramafic Composition in Jezero Crater, 24 April 2026

récolté sur la cible « Crosswind Lake » en fin de l'après-midi vers 16h28 au Sol 639, puis le tube no 173 est scellé hermétiquement en fin de soirée à 21h30. Comme pour toutes les figures servant à illustrer la compilation des campagnes d'échantillonnages, comme ici pour la figure 20, seul le premier échantillon de la paire récolté pour documenter un site est représenté pour le processus de validation. Perseverance retourne ensuite vers l'est en direction de « Three Forks » entre les Sols 641 à 652, en parcourant une distance de 568,76 mètres effectué en six séance de roulement quotidien. Après avoir effectué une campagne de 242 Sols au sud du front du delta, l'astromobile commence la construction de la première zone de dépôt d'échantillons contenant 10 tubes sur un parcours en zigzag, et déposant un tube à la fois espacé chacun d'environ 5 à 15 mètres entre les Sols 653 et 690 du 21 décembre 2022 au 28 janvier 2023 (Figure 21 et 24).

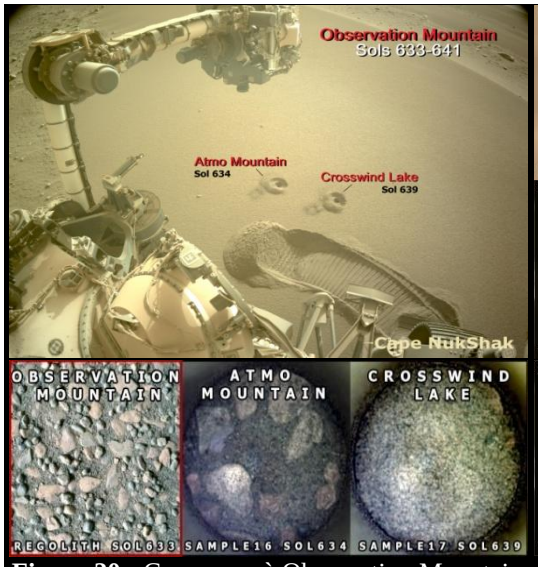


Figure 20 : Campagne à Observation Mountain (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 20 B : Validation Sol 634

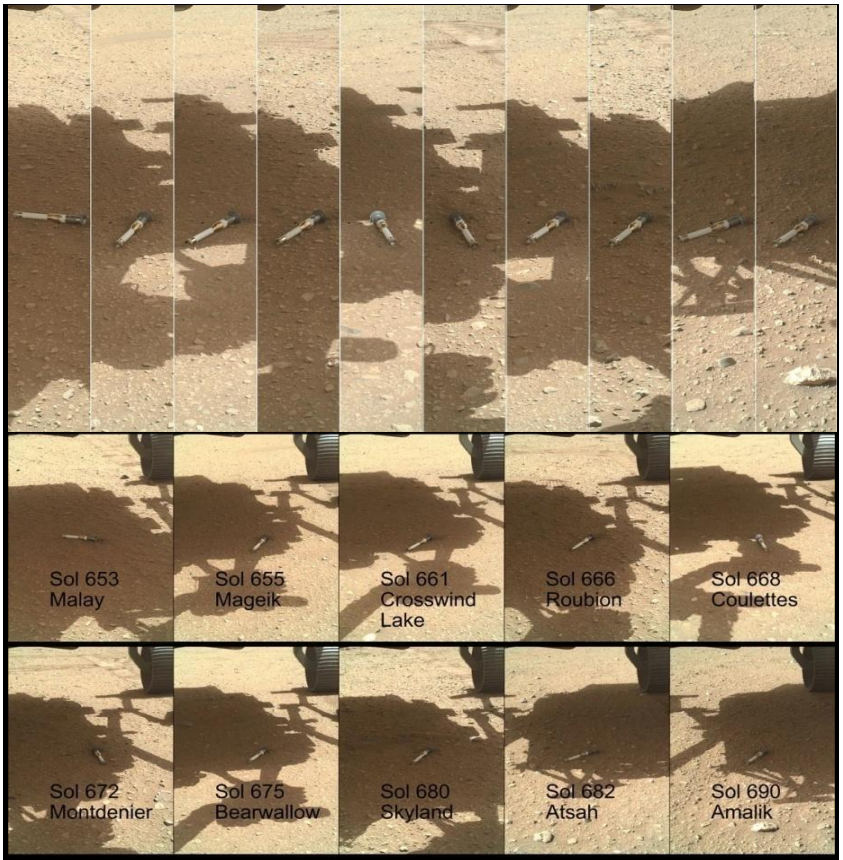


Figure 21 : Zone de dépôt du premier lot de dix échantillons (Sols 653-690) (caméra WATSON) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

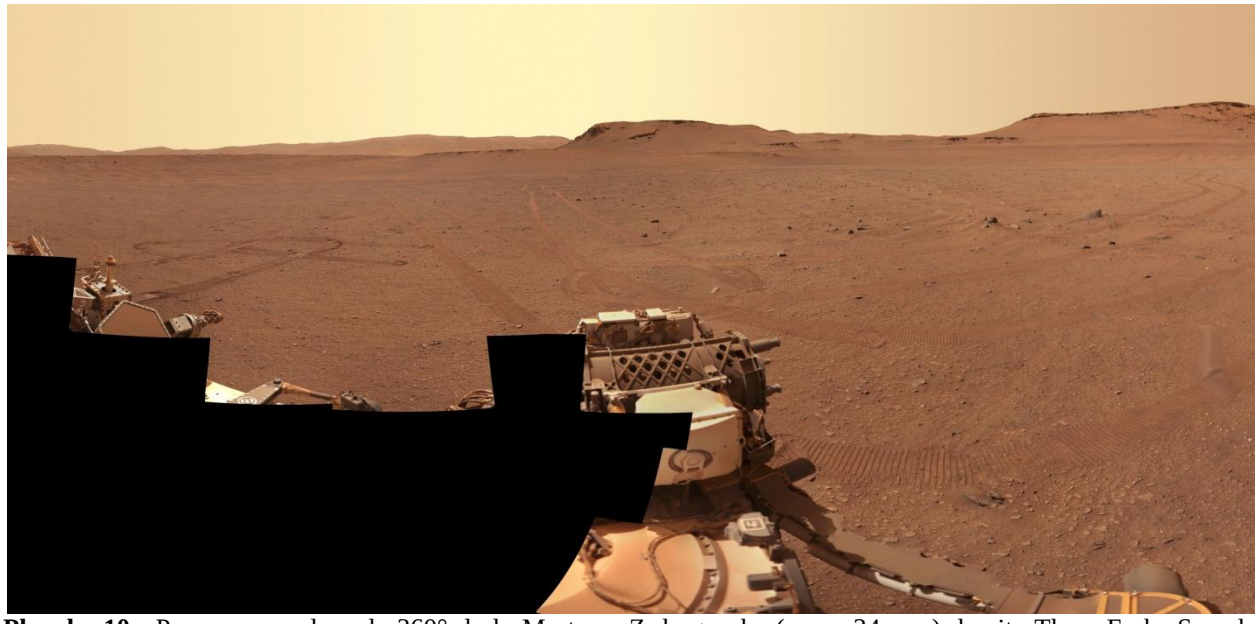


Planche 10 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Three Forks Sample Depot au Sol 670 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU/James Sorenson)

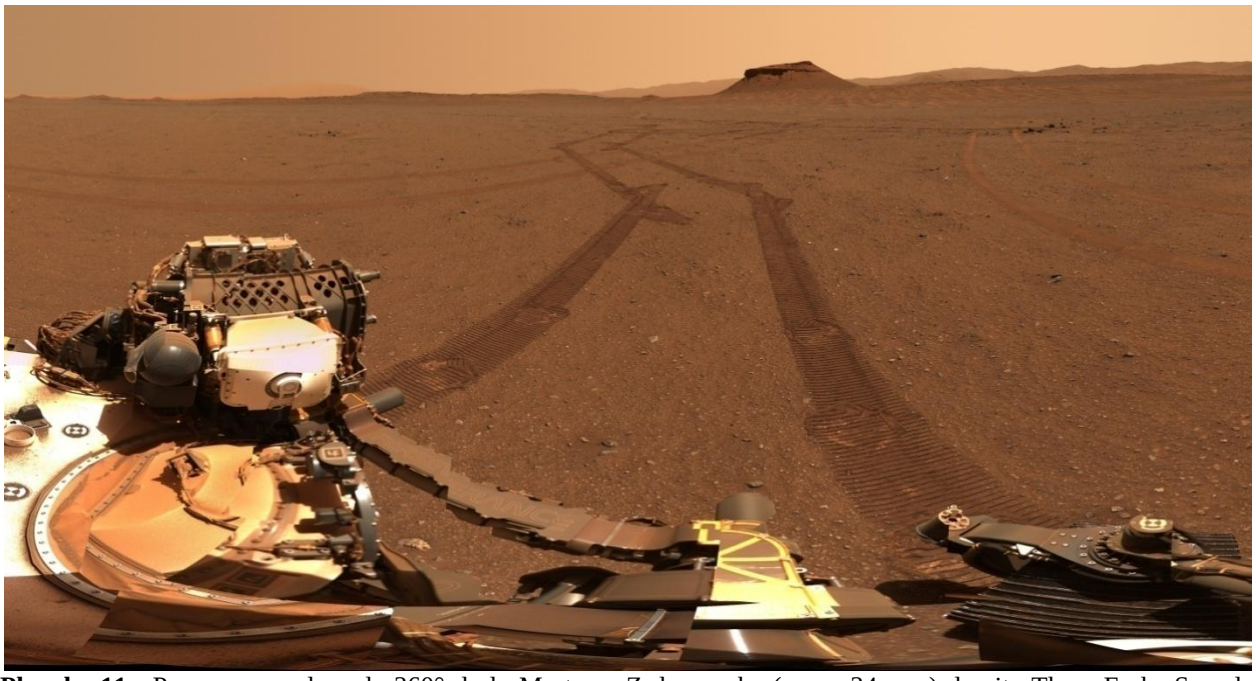


Planche 11 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Three Forks Sample Depot #2 aux Sols 690-692 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Au 1er janvier 2023 (Sol 663), Perseverance avait parcourus 14,325 km à la surface de Mars (le quatorzième km a été franchit sur le Sol 668 le même jour que le premier anniversaire martiens de 668 Sols ou 687 jours terrestre) et collecté 15 échantillons, incluant douze échantillons de roche, deux échantillons de régolithe, un échantillon atmosphérique, et trois tubes témoins on été scellés. Ces tubes représentent une collection de sauvegarde de carottes rocheuses et de régolithes (roche brisée et poussière), qui pourront être récupérés lors de la mission Mars Sample Return (MSR) de la NASA en collaboration avec l'ESA (Agence spatiale européenne),

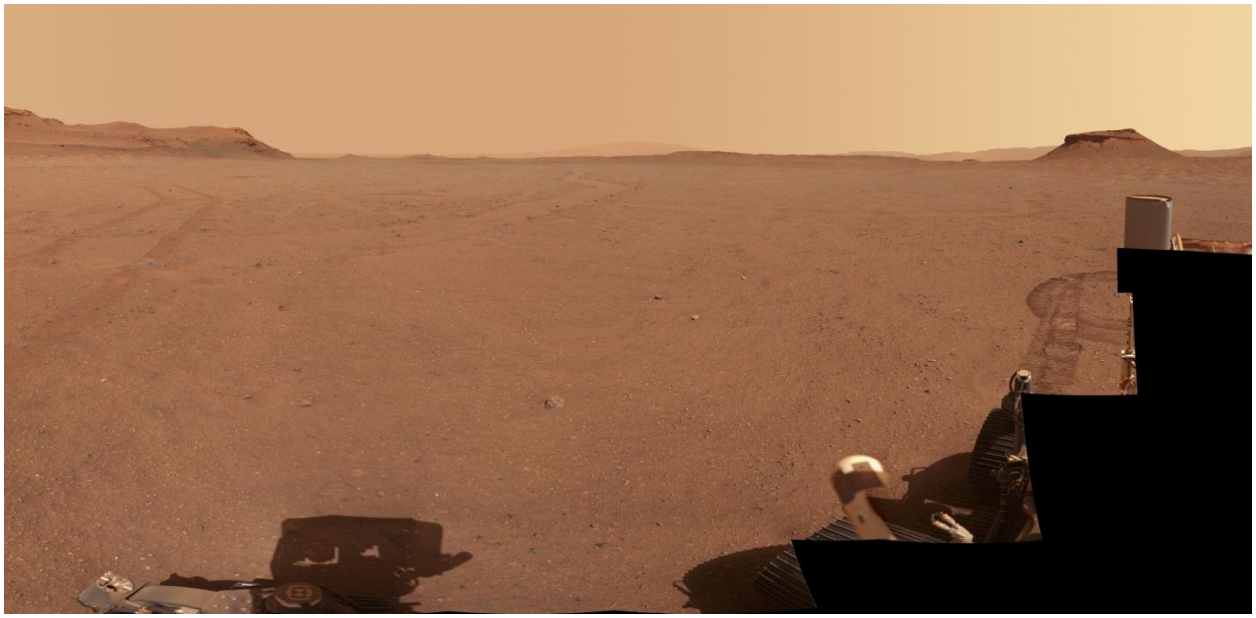


Planche 10 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Three Forks Sample Depot au Sol 670 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU/James Sorenson)

Planche 11 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) du site Three Forks Sample Depot #2 aux Sols 690-692 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

qui vise à ramener des échantillons de Mars sur Terre pour une étude plus approfondie. Perseverance va poursuivre la collecte d'échantillons au cours de son voyage, et préparer un second site de dépôts plus tard au cours de sa mission. Le premier dépôt est pour s'assurer que des sauvegardes seront disponibles au cas où quelque chose arriverait au rover. Sur la figure 21, en partant de la gauche vers la droite, figurent "Malay" (Issole Sol 337), "Mageik" (Amalik Sol 579), "Crosswind Lake" (Observation Mountain Sol 639), "Roubion" (Roubion Sol 164), "Coulettes" (Brac Sol 271), "Montdenier" (Rochette Sol 190), "Bearwallow" (Wildcat Ridge Sol

Figure 22 : Météorite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 23 : Passager clandestin (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

516), "Skyland" (Skinner Ridge Sol 495), "Atsáh" (Sid Sol 377) et "Amalik" (Amalik Sol 586, Tube témoin no 188). Durant la préparation de la zone de dépôts des tubes d'échantillons, le rover a préparé un nouveau panorama couleur de 360° avec sa caméra Mastcam-Z de gauche en milieu de l'après-midi entre 14h05 et 14h38 au Sol 670 le 8 janvier 2023 (Planche 10), et a rencontré sur sa route une nouvelle météorite sur le Sol 673 (Figure 22). Après avoir déposé les 10 tubes sur le sol martien, l'astromobile prend un selfie avec la caméra WATSON pour immortaliser cet exploit en début de l'après-midi entre 11h37 et 12h55 sur le Sol 684 le 22 janvier 2023 (Figure 24). Entre les Sols 690 et 692 du 28 au 30 janvier 2023, l'astromobile prend une nouvelle vue panoramique couleur de 360° des environs avec sa caméra Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) (Planche 11). Les vues des planches 10 et 11 dévoilent le magnifique paysage martien donnant sur la première zone de dépôt d'échantillon situé à « Three Forks ». Vers le centre de l'image de gauche de la planche 11, nous retrouvons « Kodiak », suivit un peut plus loin dans la partie gauche de l'image de droite de « Cap Nukshak » et de « Whale Mountain », de l'entrée de la vallée et du passage « Hawksbill Gap » situé devant l'escarpement à peine visible de « Rocky Top », suivit à droite des falaises abruptes de « Franklin Cliffs » qui délimite le flanc sud-est des parois du delta du cratère Jezero.

Après l'achèvement des activités de la construction de la zone de dépôt d'échantillons sur le Sol 693[43], Perseverance commence à remontée vers « Hawksbill Gap », marquant ainsi la fin officielle de la campagne de récolte d'échantillon au Front du Delta (Fan Front Campaign). Le petit hélicoptère Ingenuity prend de l'avance sur le trajet du rover, en faisant un vol de reconnaissance pour porter le regard au-delà du promontoire rocheux « Rocky Top » lors du vol 42 effectué le 4 février 2023 (Sol 697). Ingenuity a parcourus une distance de 248 mères effectuée en 137,3 secondes sur une altitude moyenne de 10 mères, pour finalement se poser en douceur dans le passage « Hawksbill Gap ». Le lendemain au Sol 698 le 6 février 2023, l'astromobile retraverse-la zone de « Devil's Tanyard » et le champ de roche « Boston Knob », une zone que le robot a déjà visitée entre les Sols 441 et 459, et remonte pour la deuxième fois vers le passage « Hawksbill Gap » en passant au nord de l'affleurement « Rocky Top » sur le Sol 709. L'astromobile ne voyage plus seul

Figure 24 : Sol 684, selfie de la première zone de dépôt (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

[43] Astrobiological Potential of Rocks Acquired by the Perseverance Rover at a Sedimentary Fan Front in Jezero Crater, 14 August 2024

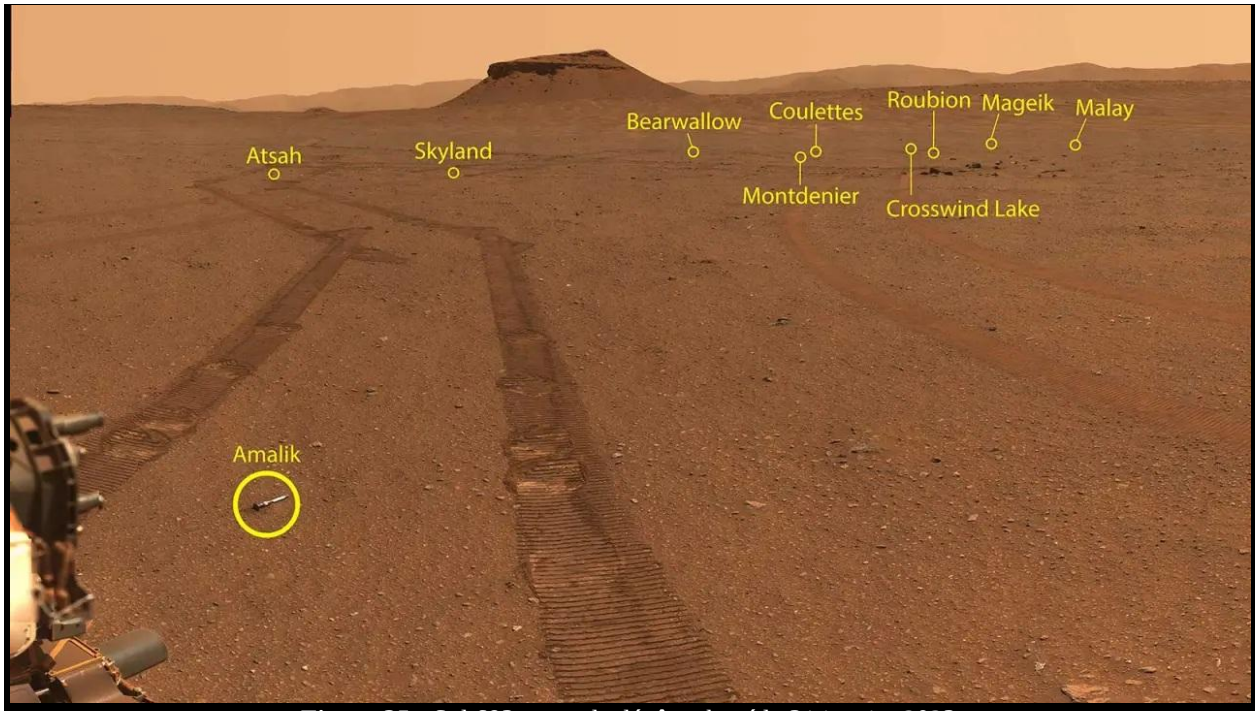
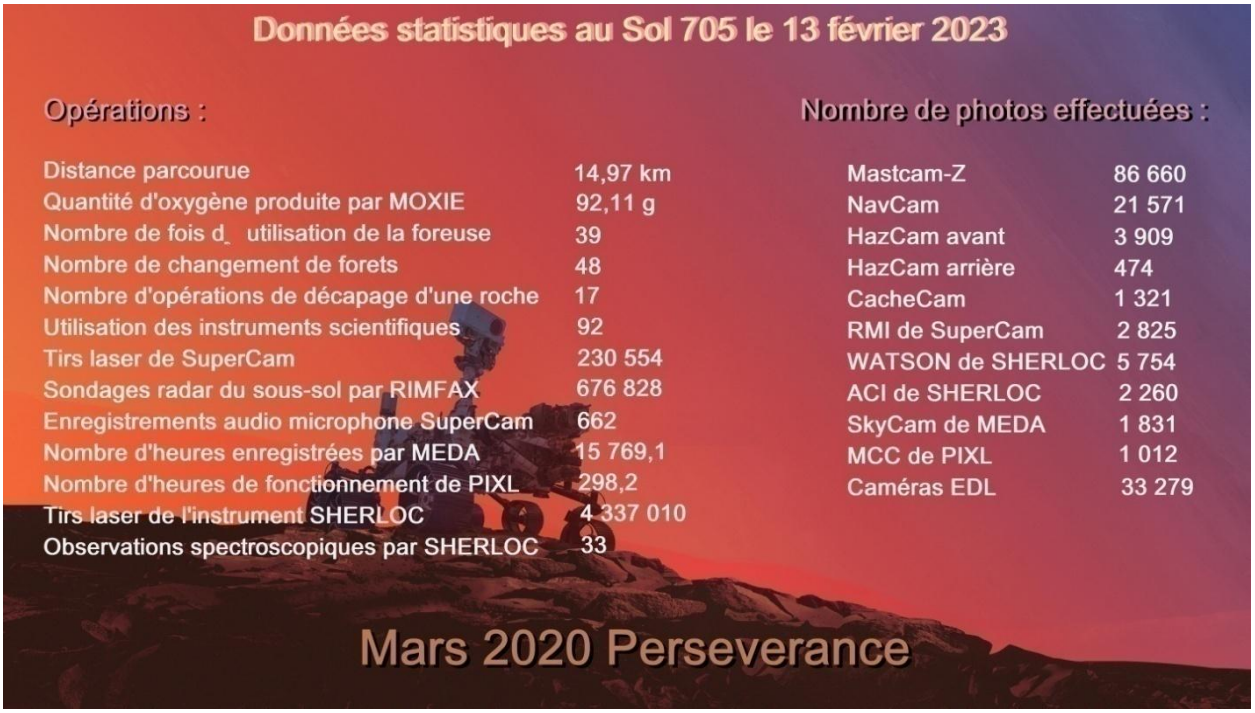


Figure 25 : Sol 693, zone de dépôt achevé le 31 janvier 2023
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)



désormais sur la planète Mars, il est accompagné par son petit voyageur clandestin qui le suit partout depuis plus d'un an déjà (366 Sols), soit du Sol 341 (4 février 2022) au Sol 707 (15 février 2023) (Figure 23). À travers sa nouvelle aventure tout en parcourant les vallées sinueuses lors de l'ascension et de la traversée du sommet du Delta, Perseverance va amorcée le début de la

Campagne du Sommet de Delta (Upper Fan Campaign)[44].

[44] Characterizing Hydrated Sulfates and Altered Phases in Jezero Crater Fan and Floor Geologic Units With SHERLOC on Mars 2020, 20 July 2024

CAMPAGNE DU SOMMET DU DELTA (Sols 708 à 913)

Figure 1 : Expérience LIBS (NASA/JPL-Caltech/F. Tauber)

L'aventure se poursuit sur le Sol 708 le 16 février 2023, ou Perseverance amorce la troisième phase de sa mission qui est celle de la campagne du sommet du delta du cratère Jezero. L'astromobile est positionné juste derrière « Rocky Top » à l'entrée de la vallée sinueuse ou se trouve le passage « Hawksbill Gap », qui permettra au rover de faire l'ascension et la traversée du sommet du delta. Après avoir parcourus 387,93 mètres entre les Sols 708 et 709, le rover fête son deuxième anniversaire terrestre à explorer la surface de la planète Mars au Sol 710 le 18 février 2023. Le cap du quinzième kilomètre est franchit au départ du Sol 714 le 22 février 2023 (Figure 1), et en cinq séances de roulement quotidien depuis le Sol 708, le robot a parcourus une distance de plus de 911,24 mètres. Contrairement au rover Curiosity dans le cratère Gale, Perseverance roule très vite à la surface de la planète Mars, pouvant parcourir une distance d'environ un kilomètre en seulement quatre séances de roulement quotidien, comme les 998,75 mètres que le robot a parcourus en avril 2022 en quatre séances de conduite entre les Sols 404 et 408 de sa mission, lors de la grande traversée en longeant le flanc sud du front du delta.

Figure 2 : Sol 718, caméra NavCam de gauche vers 12h20 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

Sur le Sol 717 à la hauteur de l'escarpement montagneux « Ashby' Corner », le robot tourne vers l'ouest en suivant les ondulations de la vallée qui longe la crête sud du cratère « Belva » de 900 mètres de diamètre (Planche 1). Le lendemain sur le Sol 718 (26 février 2023), avant de reprendre la route vers l'ouest en direction d'un nouveau site d'intérêt scientifique dénommé « Skrinkle Haven ». L'astromobile prend un nouveau cliché panoramique couleur de 360° avec sa caméra NavCam de gauche en début de l'après-midi entre 12h12 et 12h31 (Figure 2). L'image montre le trajet sinueux que parcours le rover à travers la vallée entre les escarpements montagneux « Pinestand Mountain » de 12 mètres de haut (à gauche) et de« Ashby' Corner » (à droite). Le robot parcourt ensuite 216,39 mètres au Sol 719 pour se

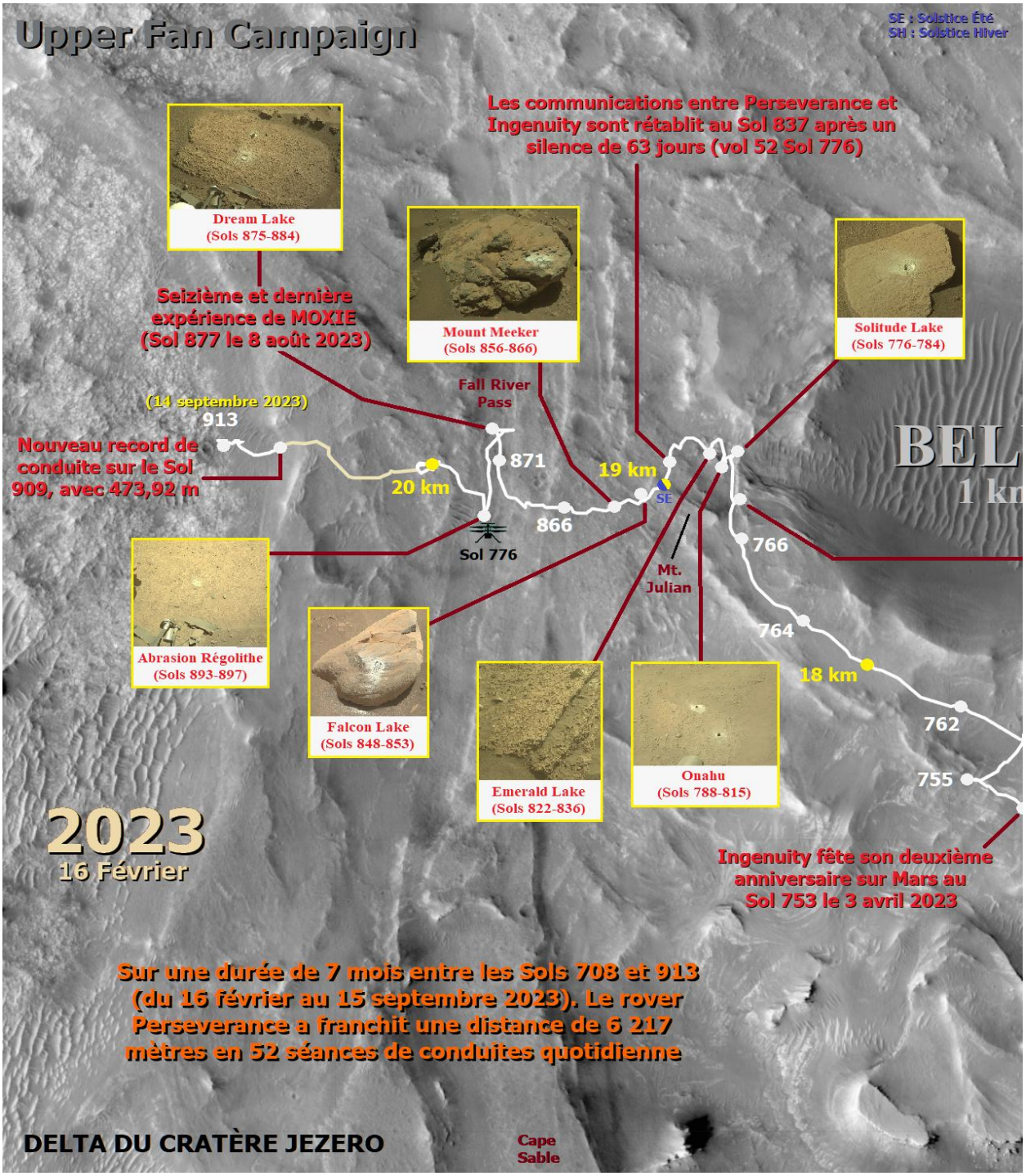


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 708 et 913. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[45] et de Phil Stooke[46] pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

rapprocher du site « Skrinkle Haven », que Perseverance rejoindra au Sol 727 après avoir

[45] Where is Perseverance?
[46] Perseverance Route Map Archive du Forum UMSF

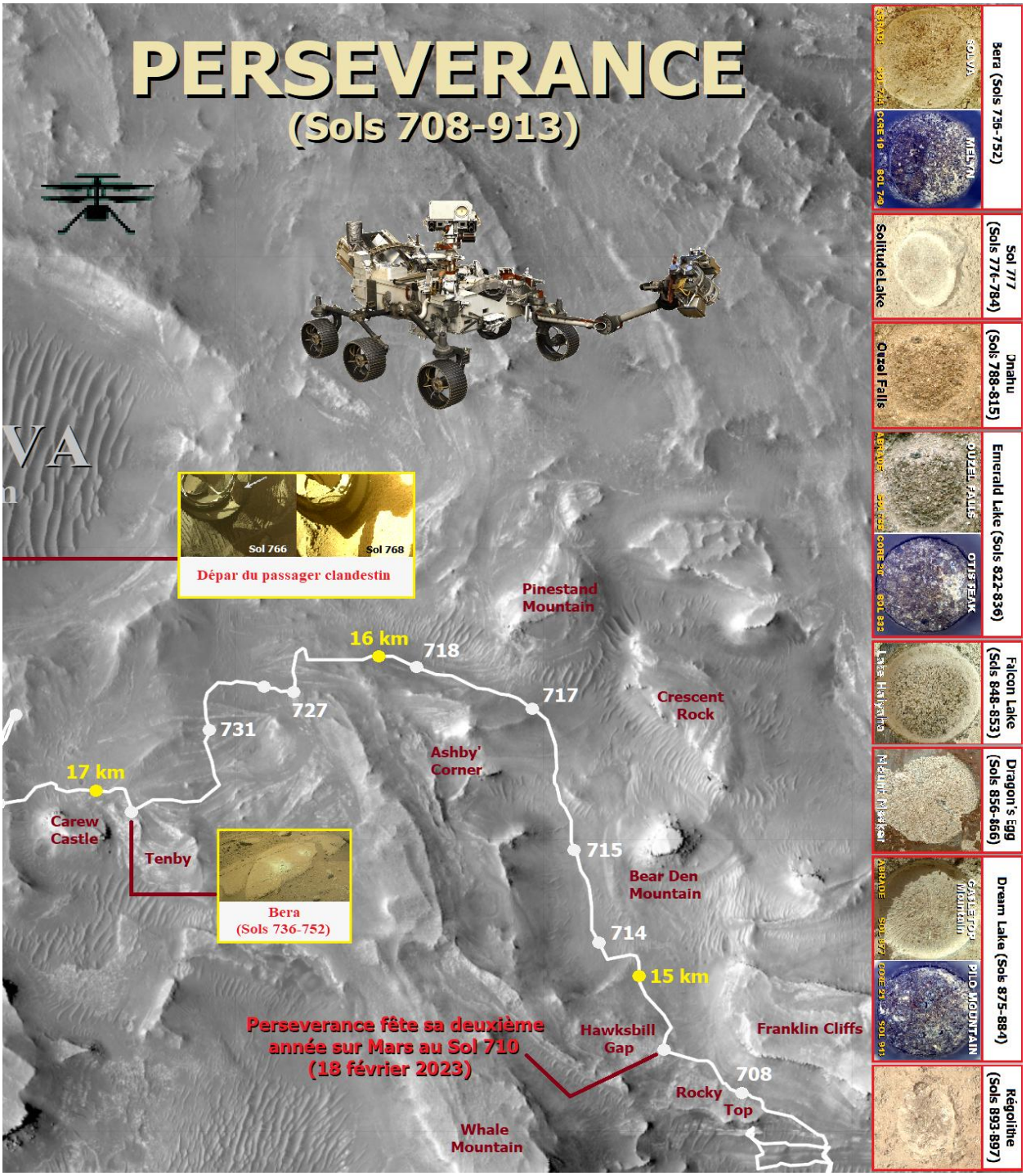


Planche 2 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 777 et 913. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA et de Phil Stooke pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

effectué un autre déplacement vers le sud de 134,4 mètres. Le cap du seizième kilomètre est franchit un peu après le départ de la séance de conduite du Sol 719. Durant cette période d'arrêt de plus d'une semaine, le robot en profite pour effectuer l'étude des environs et pour entamer une nouvelle mosaïque panoramique couleur de 360° des lieux, avec des images prises à l'aide de la

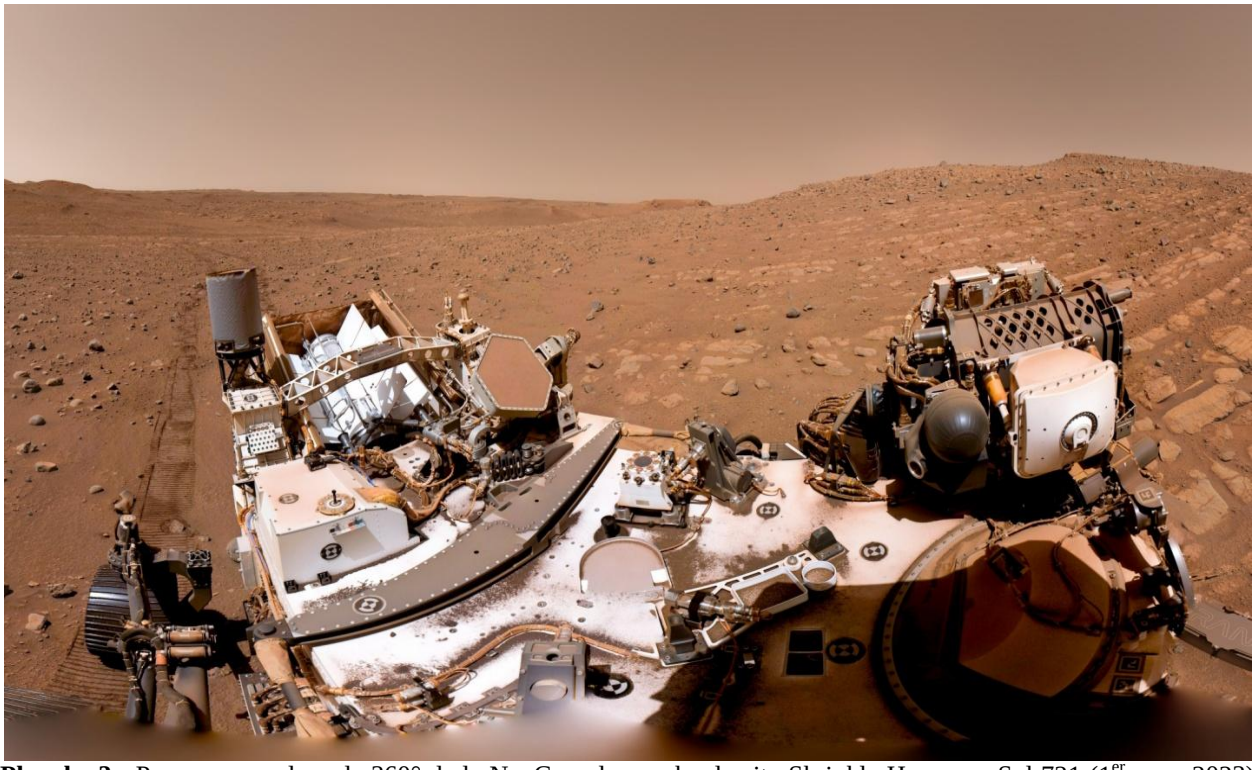


Planche 3 : Panorama couleur de 360° de la NavCam de gauche du site Skrinkle Haven au Sol 721 (1er mars 2023) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

caméra NavCam de gauche entre 14h03 et 15h21 au Sol 721 le 1er mars 2023 (Planche 3). Après un court arrêt de quatre jours sur le site baptisé « Skrinkle Haven » entre les Sols 727 et 730 du 7 au 10 mars 2023, le rebot reprend la route jusqu'au site baptisé « Tenby » (Sols 736-753) au Sol 732. Il s'agit d'une bande de roches incurvées de teinte claire à grains fins faisant partie de « l'unité curviligne », considérée comme étant le vestige d'un ancien banc de sable de berges ou situé au fond d'une rivière. Entre les Sols 718 et 732, l'astromobile a franchit une distance de plus de 1 128,66 mètres effectuée en cinq séances de roulement quotidien.

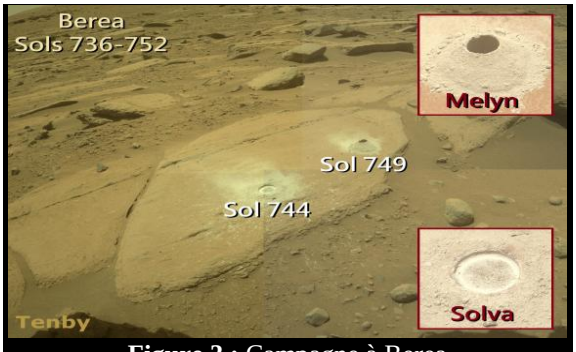


Figure 3 : Campagne à Berea

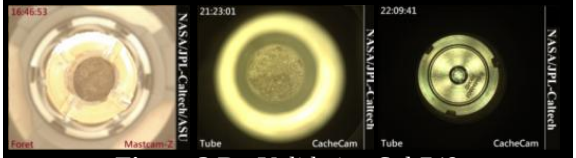


Figure 3 B : Validation Sol 749
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Le rebot effectue un léger déplacement de 21,39 mètres sur le Sol 736, dans l'objectif de se positionne devant l'affleurement « Berea ». La campagne du sommet du delta du cratère Jezero débute avec la séance d'abrasion exécutée sur la cible baptisé « Solva », qui se trouve sur l'affleurement « Berea » en début de l'après-midi au Sol 744 le 25 mars 2023 (Figure 3). Après l'étude et l'analyse de la zone d'abrasion avec les différents instruments scientifiques du rover. Le dix-neuvième carottage dénommé « Melyn » est effectué en fin d'après-midi vers 16h41 au Sol 749 le 30 mars 2023, puis après validation le tube no 214 est définitivement scellé hermétiquement en fin de soirée à 22h09. Perseverance qui n'a plus besoin de prélever deux échantillons de carottage par site

Planche 3 : Suite du panorama couleur de 360° de la NavCam de gauche du site Skrinkle Haven au Sol 721 (1er mars 2023) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

Figure 4 : Sol 755, caméra NavCam de gauche vers 13h00 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

Figure 5 : Sol 766, caméra NavCam de droite vers 16h00 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

d'étude (22 tubes de remplis sur 43), ayant déjà déposé les dix premier tubes d'échantillons dans la première zone de dépôt de secours. Le rebot reprend la route sur le Sol 753 le 3 avril 2023, et établit un nouveau record de distance parcourus sur un même Sol avec un parcourt de plus de 328,66 mètres, et franchit le cap du dix-septième kilomètre parcourus à la surface de la planète rouge peut après le départ de la séance de conduite exécutée au Sol 753. Le 3 avril 2023 marque également le deuxième anniversaire du petit hélicoptère Ingenuity, qui a touché la surface

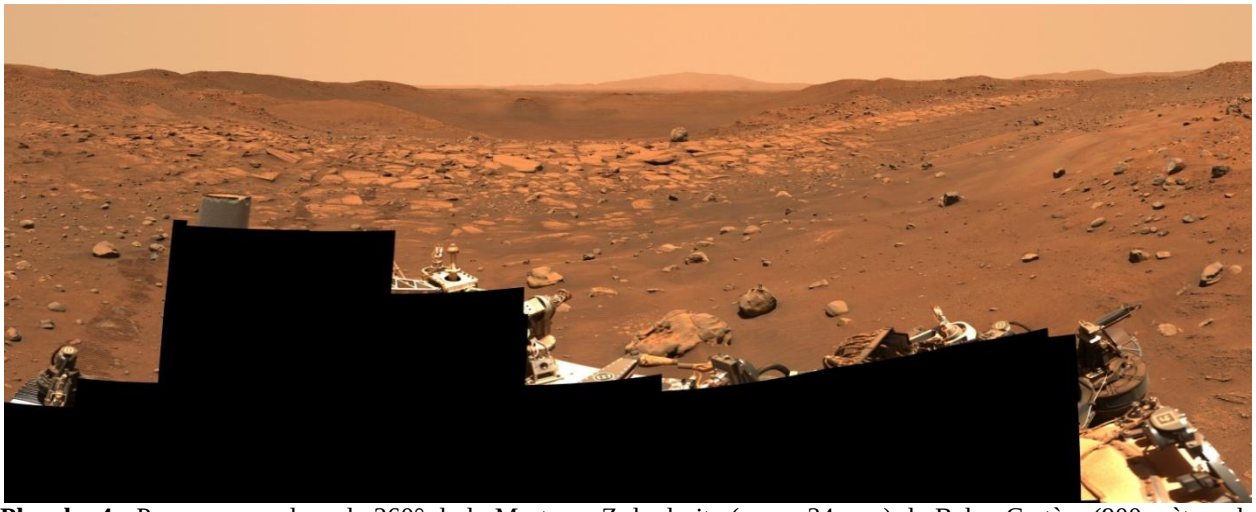


Planche 4 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) de Belva Cratère (900 mètres de diamètre) aux Sols 789-91 (10-12 mai 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

martienne pour la première fois lors de son déploiement sur le Sol 43 le 3 avril 2021. Deux années à explorer l'environnement martien par voie aérienne et servant d'éclaireur très utile à Perseverance, ayant à son actif 49 vols et parcourus une distance de plus de 11 224 mètres pour une durée de vol de 5 204,2 secondes (86,736 minutes ou 1h27). Après avoir parcourus 130,69 mètres vers l'ouest, le rover prend un nouveau panorama couleur de 360° avec sa caméra NavCam de gauche au début de l'après-midi entre 12h21 et 13h20 au Sol 755 le 5 avril 2023 (Figure 4), qui montre la progression de l'astromobile sur le terrain parsemé de gros rochés étendu sur le sol. L'astromobile a parcourus une distance de plus de 1 177,69 mètres en sept séances de conduite quotidienne entre les Sols 755 et 766, soit la distance qui sépare les paysages immortalisées des figures 4 et 5, tout en longeant la crête nord-ouest du cratère « Belva ». Durant ce long trajet, le robot passe la borne du dix-huitième kilomètre parcourus à la surface de Mars au Sol 763 le 13 avril 2023. Trois jours plus tard sur le Sol 766 le 16 avril 2023 vers la fin de l'après-midi à 15h58, Perseverance construit une nouvelle vue panoramique couleur de 360° avec sa caméra NavCam de gauche (Figure 5). La vue est composée d'une mosaïque de 26 images qui dévoile le magnifique paysage montagneux martien, avec la crête ouest du cratère « Belva » visible à chaque extrémité de l'image à environ 120 mères de distance, et vers le centre de l'image nous retrouvons au loin le petit hélicoptère Ingenuity qui est situé à environ 20 mètres derrière le rover.

Figure 6 : Départ du passager clandestin (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le rover reprend la route vers le nord en direction de « Echo Creek » (Sols 770-784), et parcours 214,85 mètres entre les Sols 768 et 770 avant d'arriver à son point le plus près sur la crête ouest du cratère « Belva », ou l'astromobile s'arrête quelque temps pour étudier les environs entre les Sols 770 et 775 du 21 au 26 avril 2023, toujours à la recherche d'un nouveau site d'échantillonnage. Lors du dernier déplacement de 100,53 mètres parcourus sur le Sol 768 le 18 avril 2023, Perseverance a perdu définitivement son petit passager clandestin. La roche qui c'était coincé dans la roue avant gauche du rover depuis le Sol 341 le 4 février 2022, n'apparait plus sur les images de la roue prises 427 Sols plus tard (Figure 6). La roche aura voyagé avec le rover en

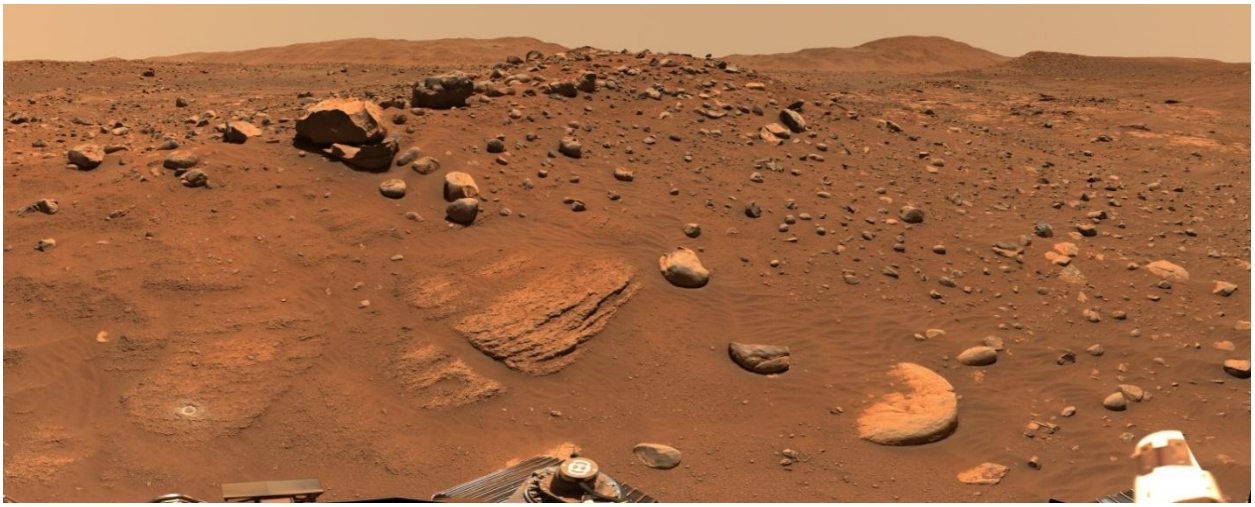


Planche 4 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) de Belva Cratère aux Sols 789-91 (10 mai 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

parcourant une distance de plus de 15 kilomètres en 1 an et 2 mois et demi. En 23 séances de roulement quotidien depuis l'entrée du robot dans la vallée au Sol 708 (16 février 2023) et jusqu'au Sol 770 (21 avril 2023) au pied du cratère « Belva », le rover aura parcourus une distance de plus de 4 181,06 mètres en l'espace de deux mois et cinq jours.

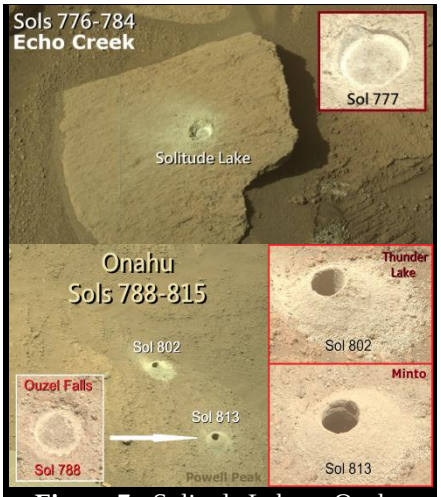


Figure 7 : Solitude Lake et Onahu (Crédit : NASA/JPL-Caltech & ASU)

Après avoir effectué une étude complète de la zone située au bord du cratère, ainsi qu'une cible de roche entre les Sols 776 et 784 dénommé « Solitude Lake », qui a été abrasée au Sol 777 le 28 avril vers 14h43, mais dont la tentative de forage a échoué a cause de la dureté de la roche (Figure 7 en haut). Perseverance quitte définitivement les environs immédiats du cratère, et reprend la route vers le sud-ouest en direction d'un affleurement rocheux situé à la base de la petite crête « Powell Peak » baptisé « Onahu » au Sol 784. Et après avoir mené une petite enquête de terrain, le rebot se positionne devant sa prochaine cible d'échantillonnage durant les neuf prochains jours entre les Sols 784 et 793 du 5 au 14 mai 2023. La deuxième campagne de carottage effectué au sommet du delta débute avec l'abrasion et le nettoyage de la cible dénommé « Ouzel Falls », qui se trouve dans la zone de travail « Onahu » au début de l'après-midi vers 12h30 au Sol 788 le 9 mai 2023 (Figure 7 en bas). L'astromobile entame une nouvelle vue panoramique couleur de 360° avec sa caméra Mastcam-Z de droite (zoom 34 mm) entre les Sols 789 et 791 du 10 au 12 mai 2023 (Planche 4). La vue est magnifique, elle dévoile le paysage martien qui donne accès sur le plancher et sur la crête qui borde le flanc ouest du cratère « Belva » de 900 mètres de diamètre (image de gauche). L'affleurement rocheux « Onahu » avec ses nodules ainsi que la zone d'abrasion « Ouzel Falls » sont visibles en bas à gauche sur l'image de droite. Et au loin sur la ligne d'horizon, on commence à voir se profiler plus nettement les deux hauts sommets faisant partit de la crête ouest du cratère Jezero, et qui borde le canal « Neretva Vallis » situé à plus de six kilomètres de distance. Le robot se déplace quelque peut sur les Sols suivant en contournant le site « Onahu »

Planche 5 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) de Stone Man Pass au Sol 817 (8 juin 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

pour mieux se repositionner (Sols 793-97), afin d'obtenir un meilleur point d'accès pour sécurisé la stabilisé et l'équilibre des instruments lors des mouvements du bras (test de précharge). Après analyse et étude complète de la zone d'abrasion par les différents instruments scientifiques du rover, une première séance de carottage est programmée sur l'affleurement composée de congloméra très friable sur la cible baptisée « Thunder Lake » au début de l'après-midi vers 13h57 au Sol 802 le 23 mai 2023, mais après vérification (Sol 810) le tube ne contenait pas assez d'échantillon. Il fut décider de refaire une deuxième tentative de carottage (« Minto ») directement dans la zone d'abrasion « Ouzel Falls » au Sol 813 le 4 juin 2023 en fin de l'après-midi vers 16h15, mais le cœur s'est malheureusement effondré en poussière lors de l'extraction, laissant le tube presque vide. (Figure 7).

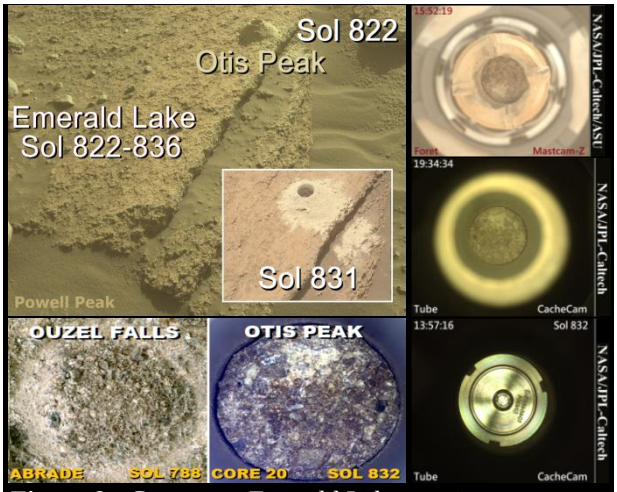


Figure 8 : Campagne Emerald Lake (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 8 B : Sol 822-832

Après la deuxième tentative échouée pour échantillonner l'affleurement « Onahu », et dans le but de récolter un échantillon de conglomérat. Perseverance se déplace plus loin en dessinant un grand arc de cercle d'une centaine de mètres, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre à la hauteur de « Stone Man Pass » entre les Sols 816 et 822. L'objectif est de rejoindre une autre partie de l'affleurement rocheux « Onahu » composé de conglomérat dénommé « Emerald Lake » (Figure 8), et qui se trouve un peut plus loin à environ 30 mètres. Les conglomérats rocheux sont des roches sédimentaires provenant de milieu aqueux constituées de gros grains arrondis de la taille d'un galet, cimentés ensemble dans une matrice de minéraux à grains plus fins pouvant être de la boue ou du sable. Les conglomérats ouvrent une fenêtre sur le passé, car ils enregistrent des informations sur les événements géologiques et les changements environnementaux qui ont participés à leur formation. La composition des conglomérats

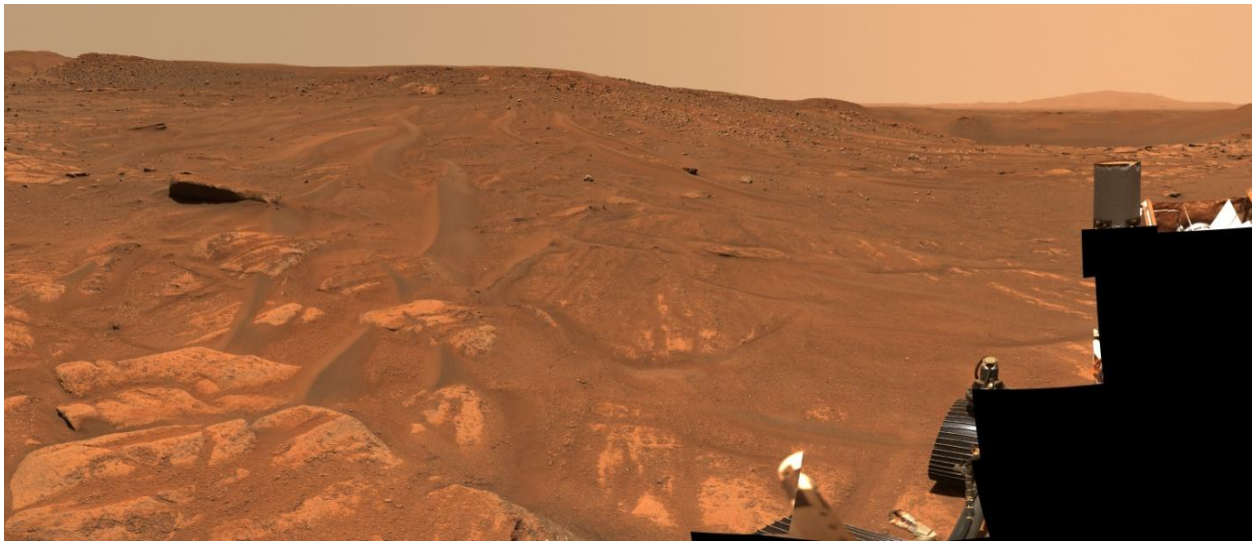


Planche 5 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) de Stone Man Pass au Sol 817 (8 juin 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 9 : Sol 838, caméra NavCam de gauche vers 15h50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Figure 10 : Débris de Skycrane (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

témoigne de la géologie du terrain d'origine, soit par la taille ou la rondeur des grains qui témoignent des processus d'érosions qui ont façonnés et transportés les galets, ou de la composition de la matrice qui fournit des informations sur la chimie, le pH et l'état redox (réduction-oxydation) des fluides qui ont remplient l'espace entre les grains durant les différentes phases de leur formation. Durant le trajet vers le nouveau site de travail sur le Sol 817 le 8 juin 2023, l'astromobile monte un nouveau panorama couleur de 360° avec sa caméra Mastcam-Z de gauche en fin de matinée entre 10h56 et 12h21, la vue dévoile toujour la beauté du paysage martien qui englobe la zone baptisé « Stone Man Pass » (Planche 5). La séance de carottage est effectuée sur la cible baptisé « Otis Peak » en fin de l'après-midi vers 15h46 au Sol 822 le 13 juin, et le tube est scellé hermétiquement dix jours plus tard en début de soirée à 19h54 sur le Sol 832. « Otis Peak » est le dix-neuvième carottage rocheux collecté et scellé par Perseverance, et le deuxième échantillon acquis lors de la campagne « Upper Fan ». Les premières analyses indiquent que l'échantillon est riche en carbonate et contient une quantité importante de phosphate (Figure 8).

L'astromobile reprend la route quatre jours plus tard sur le Sol 836 à la recherche d'un nouvel espace de travail, en conduisant à travers le vaste champ de rocher « Snowdrift Peak » d'environ un demi-kilomètre de long, et parcours une distance de 150,82 mètres, puis 101,17 mètres supplémentaire son ajouté au compteur du rover au Sol 838 avec le passage de la

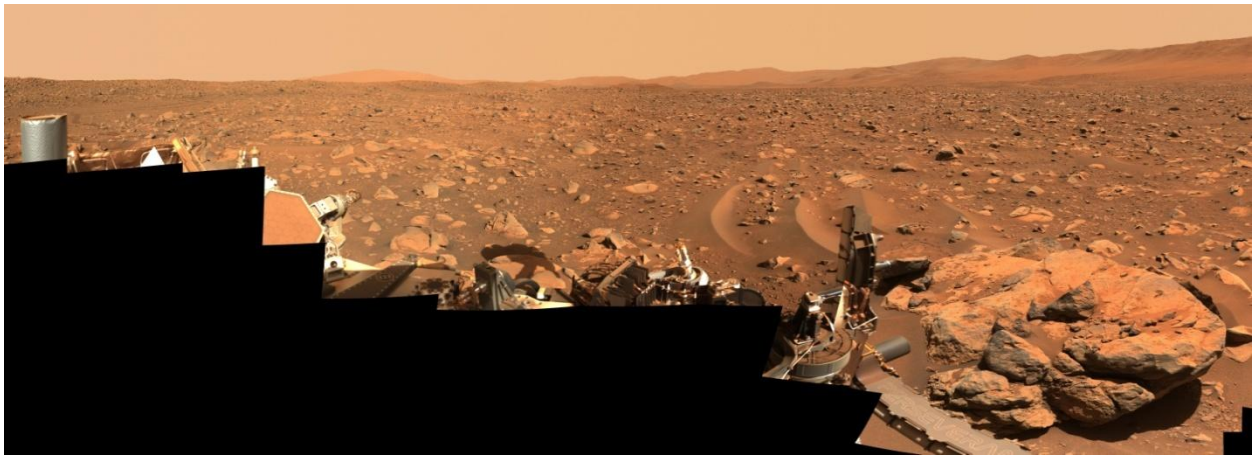


Planche 6 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) de Lookout Mountain aux Sols 857-66 (19-28 juillet 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 11 : Sol 848, caméra NavCam de droite entre 14h14 et 15h10 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

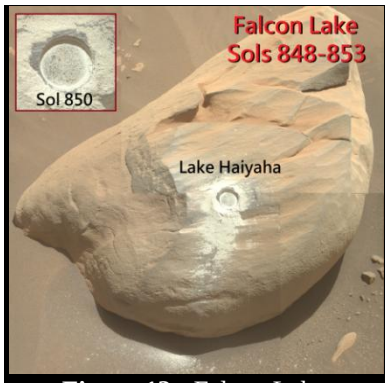


Figure 12 : Falcon Lake (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

dix-neuvième borne kilométrique en fin de parcours. Plus tard dans la journée, Perseverance entame un nouveau panorama couleur de 360° avec sa caméra NavCam de gauche, la vue est le résultat du montage d'une mosaïque de 20 images prise en fin de l'après-midi vers 15h50 le 29 juin 2023 (Figure 9). Les derniers vols d'Ingenuity ont servies à faire de la reconnaissance de terrain pour aider Perseverance à mieux progresser à travers le canyon étroit qui rend la navigation difficile. L'astromobile étant le relais de communication d'Ingenuity avec la terre, les deux engins doivent rester en contact visuel sans obstacle qui pourrait nuire au lien de communication entre les deux engins. Lors du vol 52 effectué le 26 avril 2023 au Sol 776, sur un long parcourt de 363 mètres exécuté en 145 secondes vers l'ouest en direction de « Fall River Pass », et au moment ou le petit hélicoptère Ingenuity se préparait à atterrir. Perseverance qui était à ce moment là stationné sur la crête ouest du cratère « Belva », a perdu le contacte avec l'hélicoptère en raison de la topographie vallonnée du canyon et d'une colline (« Mt. Julian ») de neuf mètres de haut plus à l'ouest qui se dressait entre eux, et qui empêchaient les antennes de se relier pour établir le lien de communication. Après un silence radio qui a durée plus de 63 jours en raison du relief montagneux des alentours. Les communications entre Perseverance et Ingenuity ont finalement été rétablit au Sol 837 le 28 juin 2023, lorsque Perseverance situé à la hauteur de « Snowdrift Peak » a été de nouveau à la porté visuel avec Ingenuity. Après vérification de l'état de fonctionnement d'Ingenuity, les vols de l'hélicoptère ont repris un peut plus de trois semaines plus tard sur le Sol 860 le 22 juillet 2023, avec le vol 53 qui a effectué un parcourt de 143 mètres

Planche 6 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (zoom 34 mm) de Lookout Mountain aux Sols 857-66 (19-28 juillet 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Planche 6 B : Neretva Vallis à l'entrée du delta (Extrait de la planche 6)

franchit en 74,9 secondes. Le rover se positionne ensuite devant un gros rocher dénommé « Falcon Lake » au Sol 848, dans le but de préparer une nouvelle campagne d'échantillonnage d'une durée de cinq jours jusqu'au Sol 853, et entame aussitôt un nouveau panorama couleur avec sa caméra de navigation NavCam de droite en milieu de l'après-midi entre 14h14 et 15h10 (Figure 11). Une séance d'abrasion et de nettoyage est effectuée en début de l'après-midi vers 12h30 sur la cible dénommée « Lake Haiyaha » au Sol 850 le 12 juillet 2023 (Figure 12). Le solstice d'été dans l'hémisphère nord de la planète arrive le lendemain sur le Sol 851 le 13 juillet 2023.

Figure 13 : Dragon's Egg (NASA/JPL-Caltech & ASU)

Après l'étude de « Falcon Lake », le rover reprend la route au Sol 854 vers l'ouest en direction de l'espace de travail « Lobe K », en parcourant une distance de 63,91 mètres. L'astromobile se repositionne en parcourant une courte distance de 15 mètres au Sol 856 le 18 juillet 2023, dans le but de se placer devant un gros rocher baptisé « Mount Meeker » pour amorcer une nouvelle campagne d'échantillonnage complète d'une durée de dix jours entre les Sols 856 et 866 du 18 au 28 juillet 2023 (Figure 13). Durant ce temps dans l'espace de stationnement, le robot entame le panorama couleur de 360° du site « Lookout Mountain » avec la Mastcam-Z de gauche (Planche 6). Sur la ligne d'horizon de l'image de droite de la planche 6, on peut voir au loin se dresser de plus en plus haut les deux sommets de la crête ouest du cratère « Jezero » qui borde le canal « Neretva Vallis », et dans lequel on peut distinguer certain détaille qui compose les parois ainsi que l'ondulation de la vallée sinueuse qui a percé les parois du flanc de la crête ouest du cratère (Planche 6 B). Une séance d'abrasion est

Figure 14 : Sol 866, caméra NavCam de gauche entre 14h30 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

programmée sur la cible « Dragon's Egg » en début de l'après-midi entre 13h39 et 14h08 au Sol 858. Et une tentative de carottage est effectué cinq jours plus tard sur la roche, sur une seconde cible (« Lost Lake ») un peut décaler vers la gauche au Sol 863 le 25 juillet 2023 vers 13h15 (Figure 13). Mais la roche était si dure que le trépan d'abrasion n'a pu pénétrer que partiellement dans la cible, et n'a pas pu creuser suffisamment profond pour recueillir un noyau de la longueur requise de 2,5 cm. L'aventure du robot mobile Perseverance sur la planète Mars est loin d'être terminé, et d'autre occasion se présentera pour trouver des nouveaux sites d'échantillonnage à étudier et à analyser pour remplir les tubes restant.

Figure 15 : Campagne à Dream Lake

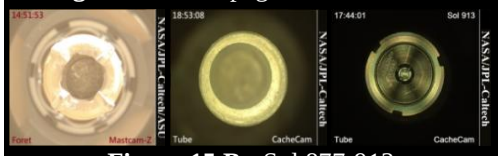


Figure 15 B : Sol 877-913
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

L'astromobile reprend la route vers l'ouest au Sol 866 vers un nouveau site d'échantillonnage, et parcours une distance de 120,15 mètres à travers un champ de rocher dénommé « Snowdrift Peak ». Aussitôt arrivé sur le nouveau site de travail, Perseverance immoralisme la région par un panorama couleur de 360° avec sa caméra de navigation NavCam de gauche au début de l'après-midi vers 14h30 (Figure 14). Sur le Sol 870 le 1er août 2023, le robot tourne vers le nord et parcours 212,95 mètres en longeant la région de « Fall River Pass » en direction de « Hague Creek », afin de rejoindre le site de travail dénommé « Dream Lake » au Sol 875 (Figure 15). Au Sol 877 le 8 août 2023, le rover amorce une séance d'abrasion en début de l'après-midi et utilise son outil de dépoussiérage à gaz (gDRT) pour éliminer la couche de poussière à la surface, puis effectue l'abrasion de la cible dénommée « Gabletop Mountain », suivit d'un nouveau nettoyage et de dépoussiérage entre 12h40 et 13h21. La seizième et dernière expérience de la mission de l'instrument MOXIE, est menée au Sol 877 le 8 août 2023 avec une production de 9,8 grammes d'oxygène. L'instrument MOXIE a satisfait à toutes les exigences techniques et a fonctionné durant une année martienne entière à travers diverses conditions qu'offre l'environnement hostile de la planète rouge, permettant ainsi aux développeurs de l'instrument d'en apprendre beaucoup sur la technologie de production d'oxygène. Après cinq jours d'étude et d'analyse de la tache d'abrasion et des alentours du site de travail, le rover exécute en milieu de l'après-midi entre 14h07 et 14h46 le forage de carottage de la cible baptisée « Pilot Mountain » au Sol 882 le 14 août 2023. Après avoir effectués les testes et la validation, le 21^{iem} tube est scellé hermétiquement et rangé dans son espace de stockage trois semaines plus tard sur le Sol 913 le 15 septembre 2023. Le tube est resté temporairement sécurisé à l'intérieur du système de stockage intermédiaire du rover le temps d'effectuer des analyses d'imagerie et de vérification visuelle du volume (Volume Assessment). Le tube est resté ouvert dans le système de

Figure 16 : Sol 884, caméras de navigaion NavCam pris vers 15h00 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

stockage pour observer si le matériau réagissait, s'effritait ou dégageait des gaz piégés une fois extrait de sa matrice rocheuse d'origine. L'astromobile reprend la route vers le sud, et après avoir fini sa séance de conduite en ajoutant 108,97 mètres au compteur, le robot prépare un nouveau panorama couleur avec sa caméra de navigation NavCam de droite en fin de l'après-midi vers 15h au Sol 884 le 16 août 2023 (Figure 16).

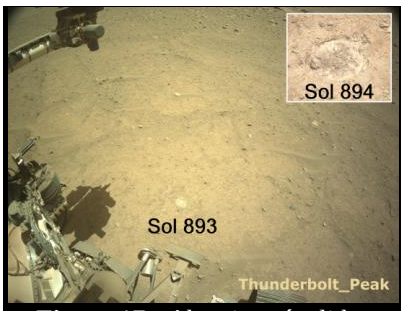


Figure 17 : Abrasion régolithe (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Après avoir contourné « Fall River Pass » en parcourant 142,56 mètres aux Sols 885 et 886, l'astromobile fait un arrête de dix jours le temps d'étudier l'environnement et le terrain martien qui l'environne entre les Sols 886 et 897. Entre temps sur le Sol 893 le 25 août 2023 en début de l'après-midi entre 12h21 et 12h45, le robot amorce une expérience de plusieurs jours fait à partir de l'abrasion de la surface de régolithe effectué à « Thunderbolt_Peak » (Figure 17). Perseverance reprend la route au Sol 897 en changeant de direction pour rouler vers le nord-ouest, et parcours une distance de 192,7 mètres en trois séances de roulements quotidiennes jusqu'au Sol 903, ou le cap du vingtième kilomètres parcourus à la surface de la planète Mars est franchit. Le lendemain au Sol 904, l'astromobile prend un nouveau panorama couleur avec sa caméra de navigation NavCam de droite en fin de l'après-midi vers 15h50 (Figure 18). Le rover reprend la route sur le Sol 905 le 6 septembre 2023 en se dirigeant vers « Mandu Wall », une ligne de crête qui sépare deux unités géologiques le long du bord intérieur ouest du cratère Jezero, et en quatre séances de roulement quotidien (Sols 905-911) Perseverance franchi une distance de plus de 643,55 mètres (Figure 19). Durant ce dernier long trajet, le rebot a battue le record de distance parcourus lors d'une même séance de conduite quotidienne en roulant sur une distance de 473,92 mètres au Sol 909, et fait la découverte de la silice (calcédoine) au Sol 910 effectué par SuperCam sur une cible de roche flotante partiellement enfouie de couleur claire sélectionné par le logiciel AEGIS (AEGIS_910A).

Figure 18 : Sol 904, caméra NavCam de droite vers 15h50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/Simeon Schmauß)

L'astromobile arrive devant sa prochaine cible d'échantillonnage au Sol 911 le 8

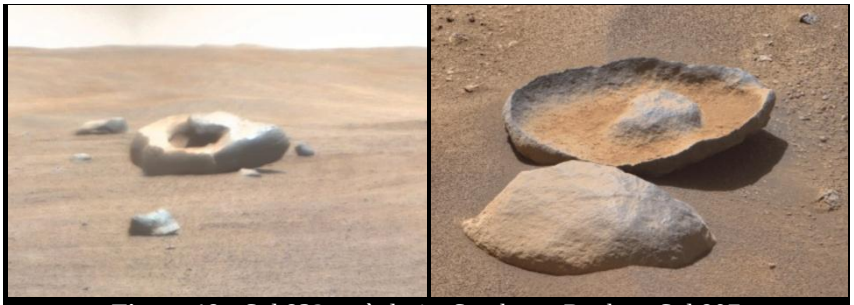
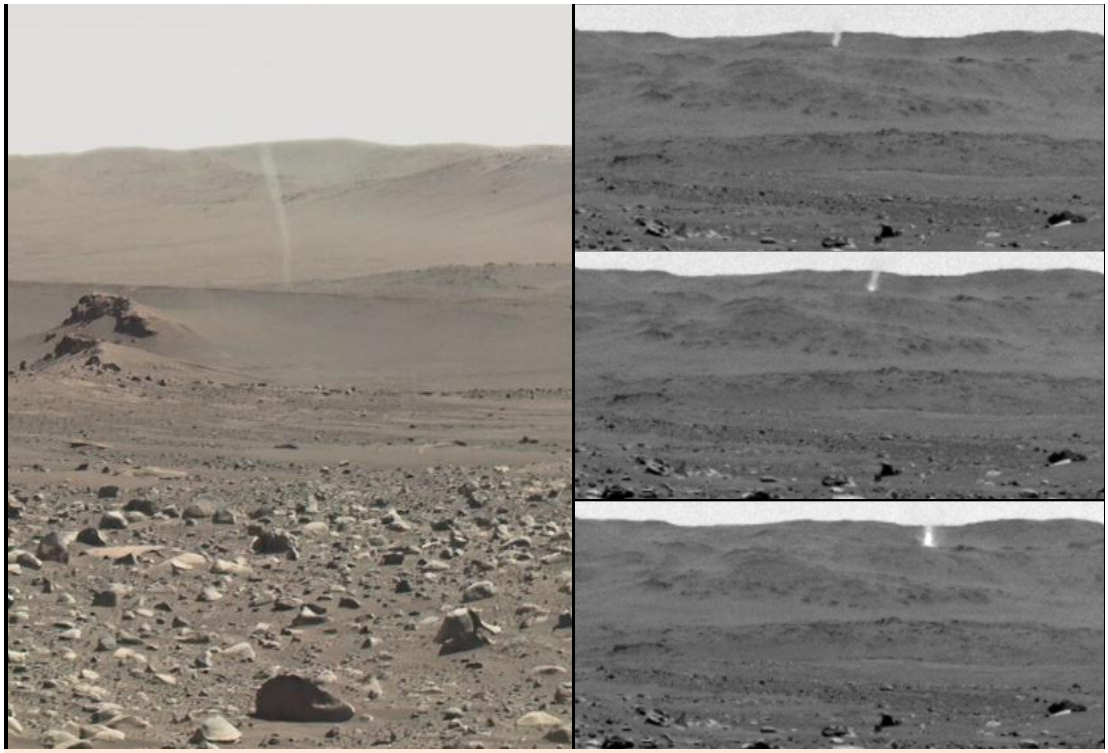


Figure 19 : Sol 832, et à droite Sombrero Rock au Sol 907
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU/ & Nev T pour l'image de droite)

septembre 2023 à un endroit nommé « Hans Amundsen Memorial » (Figure 20). Il s'agi d'une unité géologique ou la présence de carbonate a été détecté depuis des ondes orbitales. Cela marque la fin de la campagne du sommet du delta (« Upper Fan ») et le début de la campagne de l'unité marginale (« Margin Unit ») à partir du Sol 914 le 15 septembre 2023, visant à enquêter sur l'intrigante unité carbonatée située le long du bord intérieur ouest du cratère Jezero. Ce quatrième segment de la mission Mars 2020 devrait durer environ 230 Sols (équivalent à environ 8 mois terrestres), et verra Perseverance parcourir une partie du canal « Neretva Vallis » jusqu'au bord du cratère, s'arrêtant pour mener des recherches scientifiques à distance et de proximité, des observations et faire des forages.

Figure 20 : Sol 911, caméra NavCam de droite pris vers 15h00 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)



Sol 755 **Sol 899**

Figure 21 : Exemple de Dust Devil (Crédit : NASA/JPL-Caltech et à gauche Kevin M. Gill)

CAMPAGNE MARGIN UNIT ET NERETVA VALLIS (Sols 914 à 1243)

L'aventure se poursuit sur le Sol 914 le 15 septembre 2023 avec le début de la campagne d'échantillonnage effectuée dans la partie nord-est de l'unité marginale (Campagne Margin Unit), dans l'une des unités géologiques riche en sulfates et en carbonates dénommée « Mandu Wall ». La décision d'échantillonner cette zone était basée sur des images qui montraient des roches intéressantes prises par l'hélicoptère Ingenuity lors du vol no 56 effectué au Sol 894 (25 août 2023). La campagne d'échantillonnage de « Margin Unit » (un ancien rivage lacustre riche en olivine) débute juste après le vol stationnaire de test no 59 d'Ingenuity effectué sur une altitude de 20 mètres durant 142,6 secondes. La séance d'abrasion et de nettoyage est exécutée sur la cible de roche baptisée « Amherst Point » situé sur le pavé d'affleurement dénommé « Hans Amundsen Memorial » en début de l'après-midi entre 11h32 et 12h04 au Sol 915 le 17 septembre 2023 (Figure 1). L'étude de la zone d'abrasion par les différents instruments scientifique du rover a révélé la présence de grains verts et vitreux, qui représentent certains des matériaux les plus jeunes étudiés jusqu'ici dans le cratère « Jezero » par Perseverance. Les analyses PIXL et SHERLOC ont identifié pour la première fois la nesquehonite, un carbonate de magnésium trihydraté ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$). La collecte d'échantillon se fera que huit jours plus tard sur la cible baptisée « Pelican Point » foré en fin de l'après-midi entre 14h39 et 15h10 au Sol 923 le 25 septembre 2023. Après les vérifications d'usage pour vérifier le contenu échantillonné dans du tube, le 25^{iem} tube (no 178) est scellé hermétiquement et incéré dans son espace de stockage en fin de soirée à 22:01:37 LMST (Figure 1:B).

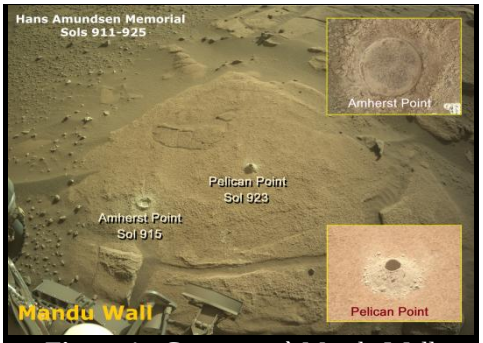


Figure 1 : Campagne à Mandu Wall

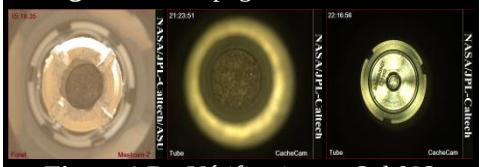


Figure 1 B : Vérification au Sol 923
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

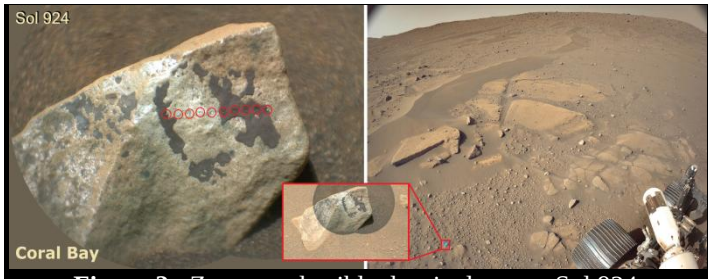


Figure 2 : Zoom sur la cible des tirs laser au Sol 924
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES/IRAP/Franz Tauber)

Avant de quitter définitivement les lieux, une expérience avec le laser LIBS de SuperCam est menée le lendemain au Sol 924 sur la roche flottante (float rock) « Coral Bay » de teinte claire et de taille semblable à un galet riche en aluminium, en dessinant un alignement de dix point de 30 tirs laser par point (Figure 2). Perseverance

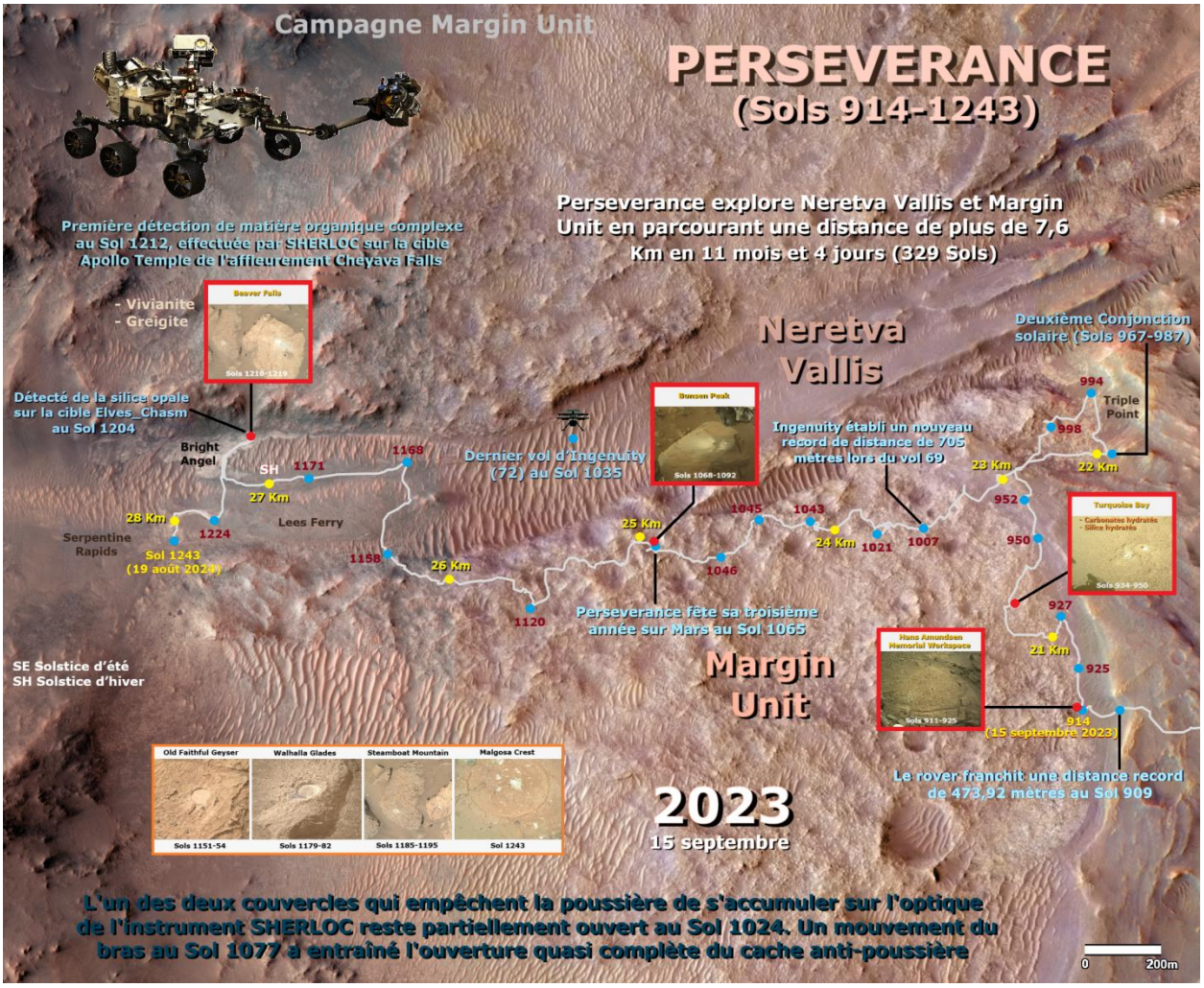


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 914 et 1243 du 15 septembre 2023 au 19 août 2024. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[47] et de Phil Stooke pour les détails. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

reprend la route vers le nord-ouest en direction de « Lake Newell » entre les Sols 925 et 932, du 27 septembre au 4 octobre 2023, et parcourt une distance de 669,93 mètres en six séances de roulement quotidien. Durant le trajet sur le Sol 929, le rover passe la borne du 21^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Le petit hélicoptère Ingenuity établit un nouveau record sur le Sol 933 le 5 octobre 2023 en volant sur une altitude de 24 mètres durant plus de deux minutes (129,5 secondes). L'astromobile se positionne devant sa prochaine cible d'échantillonnage qui se trouve sur l'affleurement « Lake Newell » (Sols 934-950) se trouvant dans la zone d'intérêt « Turquoise Bay » (Planche 1-2), et amorce une séance d'abrasion et de nettoyage sur la cible « Bills Bay » au début de l'après-midi entre 11h56 et 12h22 sur le Sol 935 le 7 octobre 2023 (Figure 3). Le robot utilise ensuite l'instrument PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry) pour étudier la chimie interne de la roche. Les analyses effectuées par le spectromètre Raman et de fluorescence à résonance UV profond de SHERLOC obtenus dans

[47] Where is Perseverance?

deux zones différentes, ont montrées pour la première fois que la roche était riche en carbonates hydratés et en silice hydratés, devenant la première détection confirmée d'une matrice à base de silice et de carbonates hydratée agissant comme ciment. Les analyses préliminaires effectuées sur les échantillons récoltés dans l'unité marginale contiennent du carbonate et de la silice en abondance, ce qui indique clairement le rôle dominant de l'eau liquide dans leur formation[48]. La collecte de l'échantillon est effectuée sur la cible « Lefroy Bay » en fin de l'après-midi entre 15h00 et 15h34 au Sol 942 le 14 octobre 2023, il s'agit d'un échantillon riche en carbonate et qui contient une grande quantité de silice à grains fins. Une semaine plus tard, le tube no 263 est vérifié puis scellé hermétiquement et conduite dans son espace de rangement pour y être stocké à la fin de l'après-midi au Sol 949 à 15h15 (LMST) le 21 octobre 2023 (Figure 3:B). Une étude publiée en 2026 révèle que l'énigmatique « unité marginale » du cratère « Jezero » a été façonnée par une séquence complexe d'anciens lacs, de systèmes d'eaux souterraines et de fluides hydrothermaux[49]. L'astromobile reprend la route vers le nord en direction de « Neretva Vallis » (Planche 1), vestige d'une ancienne vallée fluviale creusée par l'eau qui a percée la crête ouest du cratère « Jezero » il y a plus de 3 milliards d'années, et franchit une distance de 589,67 mètres effectuée en quatre séances de conduite quotidiennes entre les Sols 950 et 958 du 23 au 31 octobre 2023 (Figure 4), ou le rover arrive finalement à la hauteur de « Jurabi Point ».

Figure 3 : Campagne à Turquoise Bay

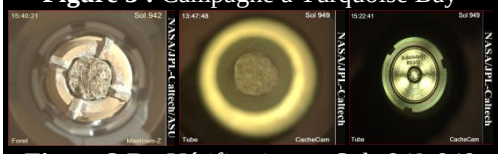


Figure 3 B : Vérification au Sols 942-949 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 4 : Sol 950, caméras de navigation NavCam vers 15h50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

La deuxième conjonction solaire s'approche de plus en plus et tout contacte radio avec la terre, qui sera alors située de l'autre côté du soleil à environ 378 millions de kilomètres de distance par rapport à Mars, seront interrompus entre les Sols 967 et 987 du 9 au 29 novembre 2023. Perseverance doit aller rejoindre le plus vite possible un site de stationnement dénommé « Airey Hill » qui se trouve plus à l'est dans la zone « Triple Point » dénommé « Gnaraloo Bay » (Sols 959-999), un endroit où trois types de terrain géologique font jonction. Il s'agit des types de terrain géologique composé de roches sédimentaires curvilignes (Upper Fan), de l'unité riche en rochers (Lobe K et Snowdrift Peak) et de l'unité Marginale qui contient des carbonates. Sur le Sol 959, le robot change de direction et roule vers l'est en direction de « Airey Hill » en parcourant une distance de 292,1 mètres, ou le rover passe la borne du 22^{iem} kilomètre parcourus à la surface

[48] Mars Rover Perseverance : en Busca de Microbios Marcianos, Kenneth Farley, 23 mai 2024
[49] Lake- and groundwater-associated alteration of the olivine-rich Margin unit in Jezero crater, 21 September 2026

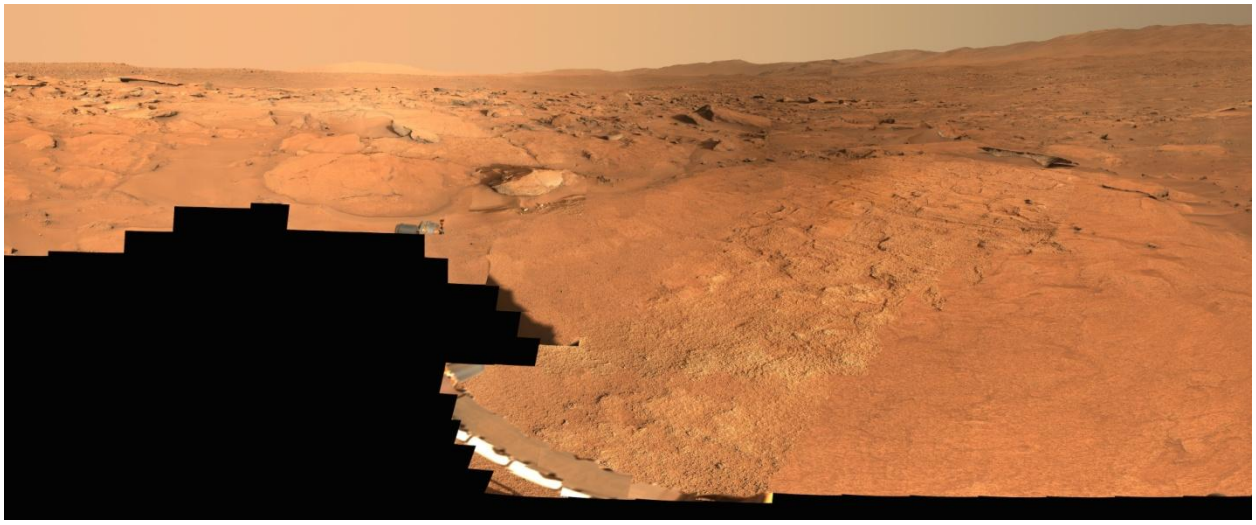


Planche 1-2 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) de “Turquoise Bay ” aux Sols 936-944 (du 8 au 16 octobre 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Planche 2 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) de “Airey Hill” aux Sols 962-65 (du 4 au 7 novembre 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

de la planète Mars. Sur le Sol suivant l’astromobile franchis une distance de 41,08 mètres avant d’arriver à la zone de stationnement. Perseverance restera stationné durant plus d’un mois entre les Sols 960 et 991 du 2 novembre au 4 décembre 2023 (Planche 3), occupé a exécuté une séquence simplifiée d’activité routinière préprogrammée contenue en mémoire durant cette longue période de silence radio, et avant de reprendre des activités de conduites sur le terrain après la reprise des communications à la sortie de la conjonction solaire. Durant la conjonction solaire, le rover profite de se temps de faible activité pour préparer avec son système d’imagerie Mastcam-Z (34 mm et zoom 100 mm) un gigantesque panorama couleur de 360° du site de stationnement « Airey Hill » (Planche 2). Le panorama est composé d’une mosaïque de 993 images faisant plus de 2,38 milliards de pixels. Les images de cette mosaïque ont été capturées

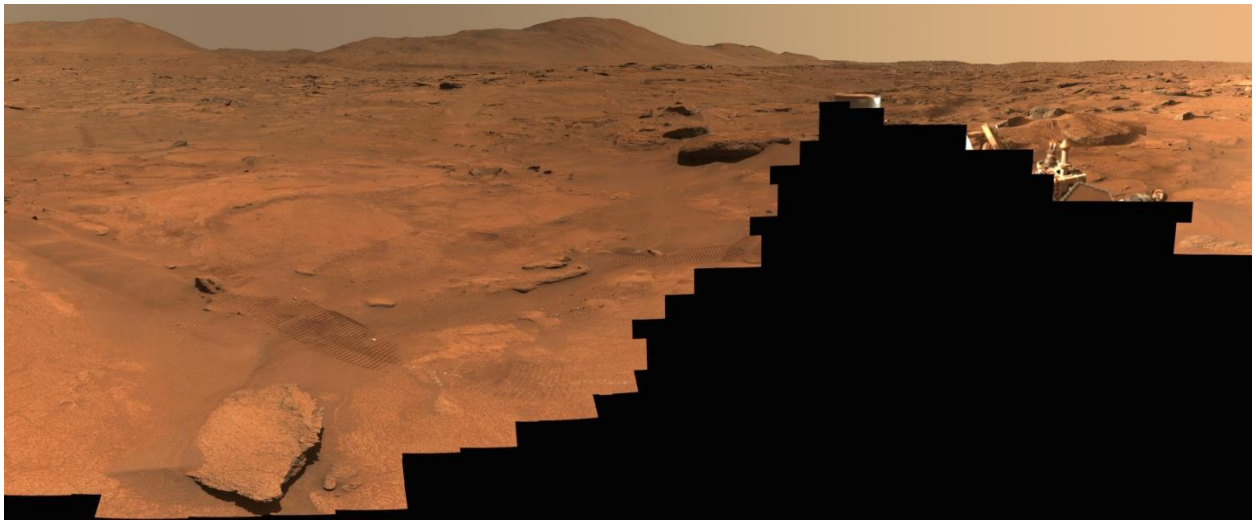


Planche 1-2 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) de "Turquoise Bay " aux Sols 936-944 (du 8 au 16 octobre 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

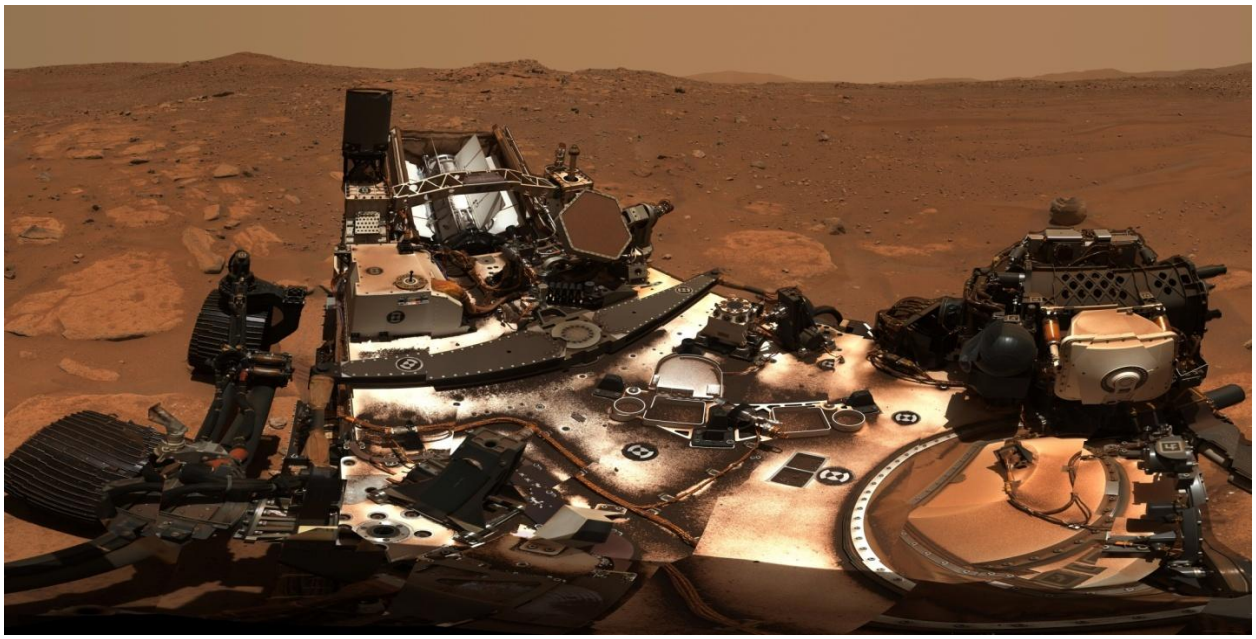


Planche 2 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) de "Airey Hill" aux Sols 962-65 (du 4 au 7 novembre 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 5 : Sol 994, caméras de navigation NavCam vers 13h20 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

par la Mastcam-Z du rover les 4, 5 et 7 novembre 2023 (Sols 962-63 et 965). Les roches plates de couleur claire visible dans les images de la planche 2, ont probablement été déposées jadis sur les

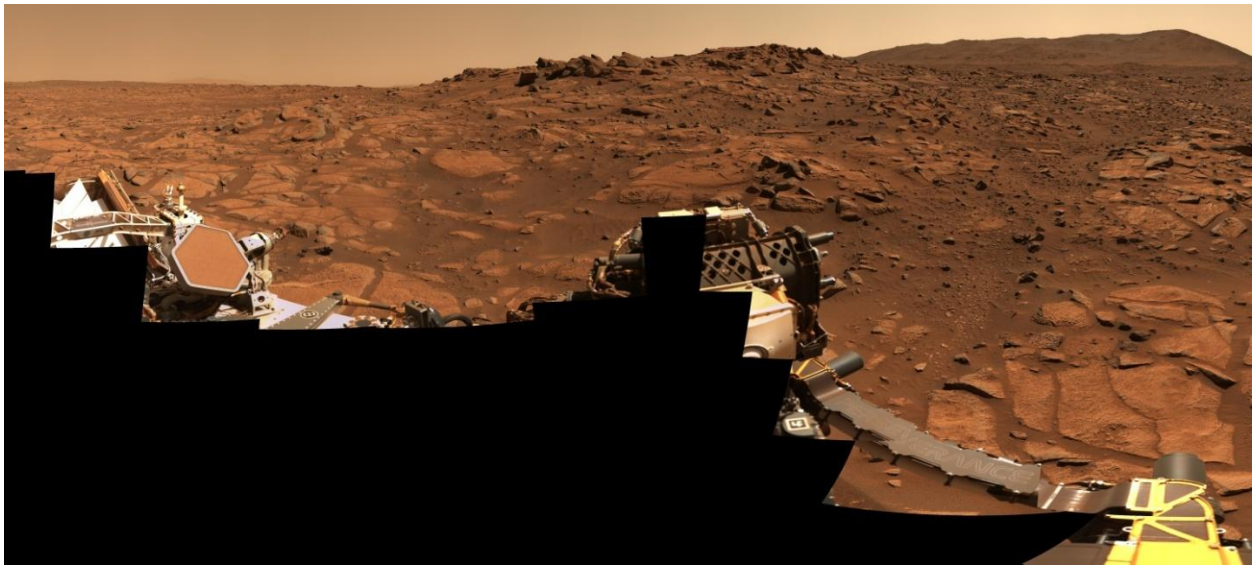


Planche 3 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (no 34) de gauche (34 mm) de “Bunbury Margin Unit” au Sol 1009 (22 décembre 2023) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Planche 4 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z gauche (34 mm) de “Bessieres Island Margin Unit” aux Sols 1028-39 (11-22 janvier 2024) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

rives d’une rivière à débit lent, tandis que les plus gros rochers pourraient avoir été mis en place par une plus forte inondation. L’amas de roche visible vers le centre de la partie droite de l’image de gauche du panorama a été baptisée « Barrabiddy ». Dans la partie supérieure au centre de l’image de gauche du panorama de la planche 2, nous retrouvons le canyon « Neretva Vallis » qui à creusé la vallée tout en se faufilant à travers les parois de la crête ouest du cratère « Jezero », dont l’écoulement des eaux drainant d’énorme quantité de dépôts ont donné naissance au delta du cratère. Le canyon départage les parties gauche et droite de la crête nord-ouest du cratère qui se trouvent de chaque côté de la vallée qui porte le même nom « Neretva Vallis » (l’entrée du canyon est visible vers le centre de la partie supérieur de l’image de gauche entre les deux sommets qui le borde).

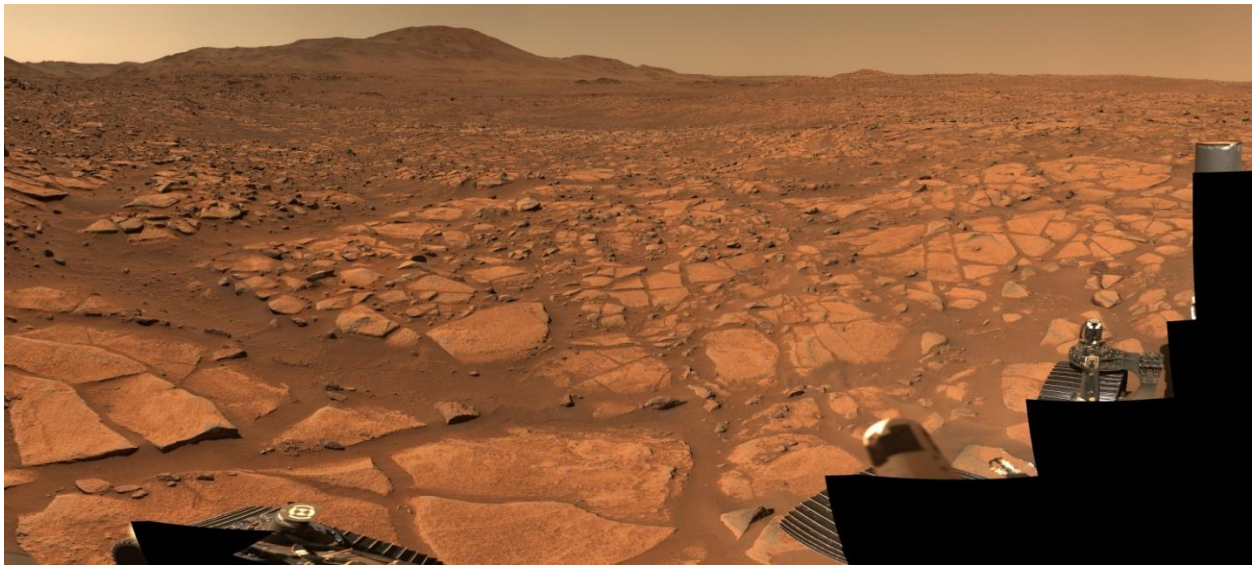


Planche 3 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z (no 34) de gauche (34 mm) de "Bunbury Margin Unit" au Sol 1009 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

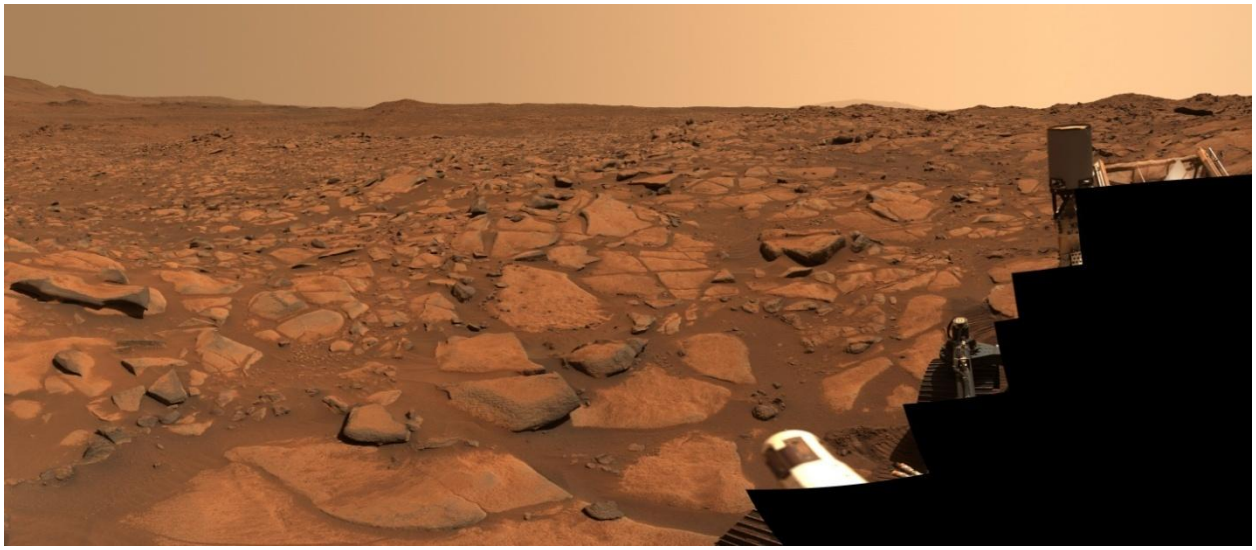


Planche 4 : Suite du panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) de "Bessieres Island Margin Unit" aux Sols 1028-39 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

L'astromobile reprend la route vers le nord en direction de « Neretva Vallis » entre les Sol 991 et 994 (du 4 au 7 décembre 2023) en parcourant une distance de 240,39 mètres en trois séances de conduites quotidiennes (Figure 5). L'astromobile tourne vers l'ouest au Sol 997 et commence à rouler en longeant la rive sud de « Neretva Vallis », et parcourt une distance de 616,62 mètres effectuée en cinq séance de roulement quotidien jusqu'au Sol 1001[50] le 14 décembre 2023 (Figure 6), ou le robot franchis la borne du 23^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Le lendemain sur le Sol 1002, le robot ajoute un nouveau 128,47 mètres à son compteur. Le petit hélicoptère Ingenuity qui survole les dunes de sables qui se trouve au fond du canal « Neretva Vallis », établit un nouveau record de vitesse au Sol 1003 lors du vol 68 effectué

[50] SuperCam Raman Activities at Jezero Crater, Mars: Observational Strategies, Data Processing, and Mineral Detections During the First 1000 Sols: 15 November 2025

Figure 6 : Sol 1000, caméras de navigation NavCam mosaïque prise entre 12h57 et 13h16
Sol 1000 (13 décembre 2023) : Après l'atterrissage, le rover a découvert que le fond du cratère de Jezero est constitué de roche ignée, ce qui signifie que sa surface a été créée à partir de magma sous la surface ou par une activité volcanique en surface. La découverte de roches ignées à la surface de Jezero a permis aux scientifiques de confirmer que le cratère s'est formé à la suite d'un impact d'astéroïde il y a près de quatre milliards d'années. Les découvertes ultérieures de grès et de mudstone par Perseverance ont permis aux scientifiques de déterminer quand les premières rivières ont commencé à couler au sein de Jezero, quelques centaines de millions d'années après l'impact de l'astéroïde. Au-dessus de ces sables et mudstones initiaux se trouvent des mudstones riches en sel, qui suggèrent la présence d'un lac peu profond en cours d'évaporation. Lorsque le lac s'est rempli, les eaux rapides ont transporté des rochers de l'extérieur de Jezero dans le lac, où ils ont finalement été répartis au sommet du delta du fleuve et dans tout le cratère. D'autres découvertes réalisées par Perseverance et Ingenuity ont conduit les planétologues à estimer que le lac de Jezero mesurait autrefois 35 kilomètres de large et 30 mètres de profondeur.
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

le 16 décembre 2023. Initialement programmé pour couvrir une distance de 828 mètres sur le terrain, afin de tester les dernières mise-à-jour des logiciels du système de vitesse élevée (Sys-ID). Ingenuity a franchit une distance plus courte que celle qui était prévue (702 mètres), mais la distance est franchie avec des pointes de vitesse maximum record de 36 km/h. Et quatre jours plus tard sur le Sol 1007 le 20 décembre 2023, Ingenuity établit un nouveau record lors du vol 69 ou l'hélicoptère a parcourus une distance record de 705 mètres, soit à un mètres près de l'ancien record établit lors du vol 25 sur le Sol 403 (8 avril 2022). Perseverance fait un arrêt de onze jours pour laisser passer la période des fêtes entre les Sols 1007 et 1018 du 20 au 31 décembre 2023. Le robot profite de ce temps d'arrêt pour prendre le panorama couleur de 360° avec la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) baptisé "Bunbury Margin Unit" au Sol 1009 le 22 décembre 2023 (Planche 3). Nous retrouvons l'entrée du canyon « Neretva Vallis » vers le centre du panorama de la planche 3. Le rover reprend la route vers l'ouest et parcourt une distance suplémentaire de 336,7 mètres en trois séances de conduites quotidienne entre les Sols 1018 et 1021. Perseverance s'arrête de nouveau devant un site de travail pour une durée de près de trois semaines jusqu'au Sol 1041 (du 3 au 24 janvier 2024). Durant cette longue pose sans séance de conduite sur le terrain, l'astromobile en profite pour monter une nouvelle vue panoramique couleur de 360° des lieux avec la Mastcam-Z de gauche (34 mm) dénommé "Bessieres Island Margin Unit" entre les Sols 1028 et 1039, du 11 au 22 janvier 2024 (Planche 4).

C'est soudain la catastrophe lors du 72^{iem} vol d'Ingenuity au Sol 1035 le 18 janvier 2024, a seulement un mois du troisième anniversaire de Perseverance sur Mars (Figure 7). À environ 1 mètre au-dessus de la surface, Ingenuity a perdu le contact avec le rover. L'hélicoptère a atterri sur le bord près du sommet d'une dune de sable situé en contre bas dans la vallée « Neretva Vallis ». Le lieu du crash a été baptisé par la suite « Valinor Hills ». Sachant que les quatre pattes d'atterrissage sont extrêmement fines, le propre poids de l'hélicoptère la fait s'enfoncer dans la fine poussière, et les pales qui tournaient encore ont heurtées de plein fouet le sommet de la dune cassant une pale de l'un des deux rotors. Les six images assemblées pour former cette mosaïque ont été capturées par la caméra RMI à haute résolution de SuperCam à environ 450 mètres de

Figure 7 : Site du crash d'Ingenuity. L'image de gauche est une mosaïque de la caméra RMI de SuperCam du Sol 1072. L'image de droite est extraite d'une mosaïque de l'imager Mastcam-Z obtenue au Sol 1052. (Credit: NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES/IRAP/Simeon Schmauß & Franz Tauber)

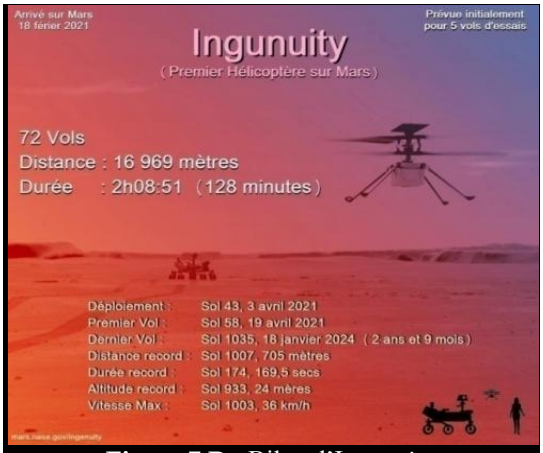


Figure 7 B : Bilan d'Ingenuity

distance (Figure 7). Conçus à l'origine comme une technologique de démonstration incluant cinq vols d'essai expérimentaux sur 30 jours, le petit hélicoptère à dépasser toute les attendes. La nouvelle mission de l'hélicoptère Ingenuity avec les correctifs logiciel en place, va désormais consister à se réveiller quotidiennement, activer ses ordinateurs de vol pour tester les performances de son panneau solaire, de ses batteries et de ses équipements électroniques. De plus, l'hélicoptère prendra une photographie de la surface avec sa caméra couleur et collectera des données de température à partir de capteurs placés dans tout l'hélicoptère.

Deux jours plus tard, l'astromobile capture avec la Mastcam-Z de gauche le transite de la lune Deimos lors de son passage devant le soleil au Sol 1037 le 20 janvier 2024 (Figure 8). La lune Phobos apparaît environ un tiers de la taille de notre pleine Lune, tandis que Deimos en fait environ un douzième, elle apparait simplement comme un point lorsqu'elle passe devant le soleil. Perseverance a observé pour la première fois un transit de la lune Phobos le 26 novembre 2022 (Sol 628), et un transit de Deimos le 5 décembre 2022 (Sol 637). À partir du 7 janvier 2024 sur le Sol 1024, les données et les images recueillis par le rover indiquent que l'un des deux couvercles qui empêchent la poussière de s'accumuler sur l'optique de la macro-caméra contextuelle (ACI) de l'instrument SHERLOC reste partiellement ouvert (Figure 9). Dans cette position, la couverture de l'optique gêne les opérations de collecte de données scientifiques, et l'instrument ne peut pas utiliser le laser UV sur des cibles rocheuses pour collecter de données spectroscopiques. Un certain nombre d'activités de diagnostic sont programmées sur les Sols suivant, afin de mieux comprendre le problème des images brouillées de la macro-caméra contextuelle (ACI) de SHERLOC. Cependant, la microscopie d'imagerie

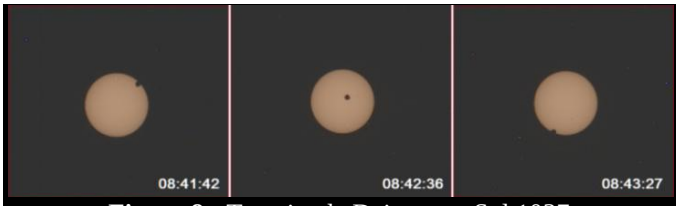


Figure 8 : Transite de Deimos au Sol 1037

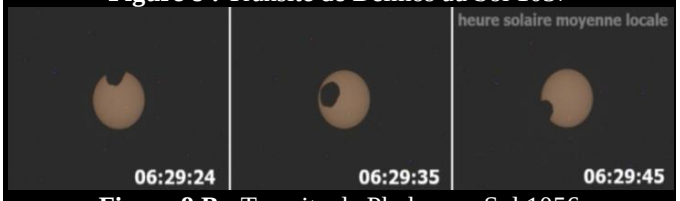


Figure 8 B : Transite de Phobos au Sol 1056 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU)

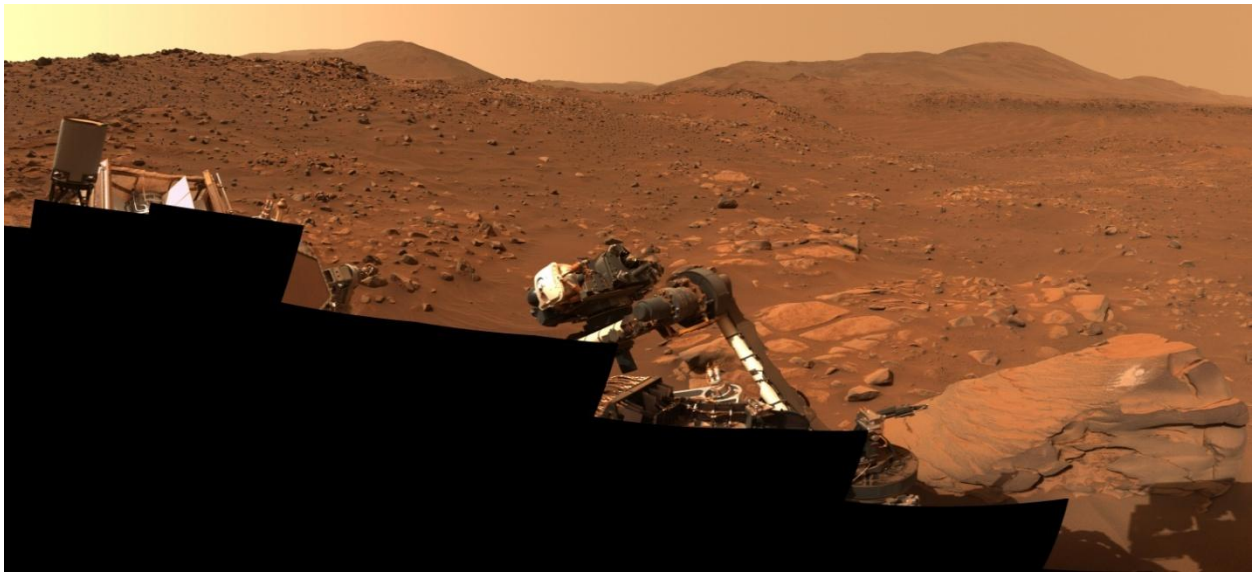


Planche 5 : Panorama couleur de 360° pris par la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site “Bunsen Peak and Neretva Vallis” entre les Sols 1074 et 1082 (du 27 février au 6 mars 2024) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

grand angle peut toujours être acquise avec WATSON. Le robot reprend la route vers l’ouest sur le Sol 1041 en longeant la crête « Muiron Island » de 10 mètres de haut sur 350 mètres de long, à la recherche d’une nouvelle cible à échantillonner, et franchit le cap du 24^{iem} kilomètre parcourus sur la planète Mars. Perseverance a parcourus une distance de 1 249,56 mètres en 11 séances de conduite journalière entre les Sols 1041 et 1063 (du 24 janvier au 16 février 2024). Deux jours plus tard au Sol 1065 le 18 février 2024, l’astromobile fête sa troisième année terrestre à explorer la surface martienne.

Figure 9 : Déblocage du bouchon de protection de la macro-caméra contextuelle (ACI) de SHERLOC (Crédits : NASA/JPL-Caltech)

Le robot effectue deux courts déplacements sur les Sols suivants (16,28 mètres au Sol 1066 et 5,53 mètres au Sol 1068), pour venir se placé tout près d’un gros roché baptisé « Bunsen Peak » (Sols 1068-1092) d'environ 1,7 mètre de diamètre sur 1 mètre de haut au Sol 1068 le 21 février 2024. L’astromobile profite de ce temps pour entamer un nouveau panorama couleur de 360° avec la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site baptisé “Bunsen Peak and Neretva Vallis” entre les Sols 1074 et 1082, du 27 février au 6 mars 2024 (Planche 5). La vallée dénommée « Neretva Vallis » parsemées d’ondulation de dune, commence déjà à être visible au loin vers le centre du panorama situé sous le sommet de la crête nord-ouest du cratère se trouvant sur le côté droite du canyon, et à droite nous retrouvons l’extrémité ouest de la crête « Muiron Island ». Le bouchon de protection contre la poussière resté entre-ouvert qui bloquait une partie de la vision de la macro-caméra contextuelle (ACI) de SHERLOC, fini par être complètement

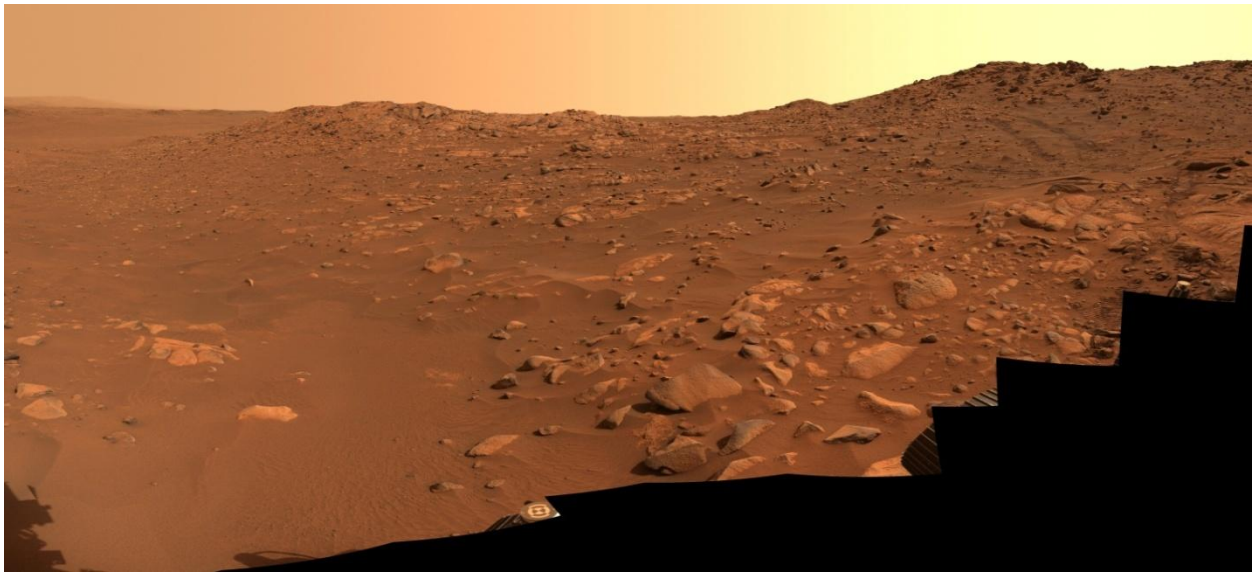


Planche 5 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site "Bunsen Peak and Neretva Vallis" entre les Sols 1074 et 1082 (du 27 février au 6 mars 2024) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

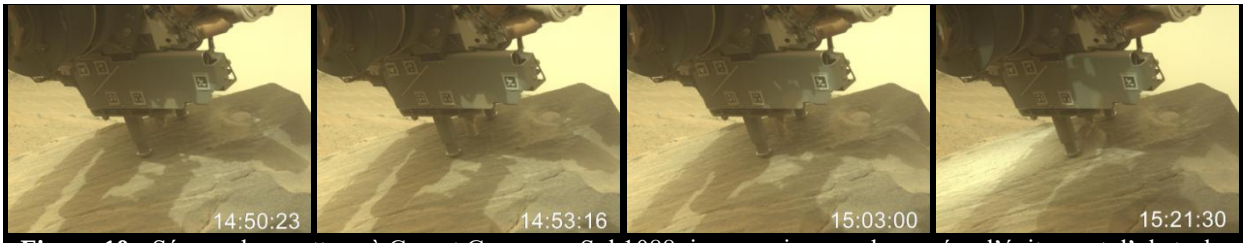


Figure 10 : Séance de carottage à Comet Geyser au Sol 1088, image prises par la caméra d'évitement d'obstacle (HazCam) avant gauche du rover (Crédits : NASA/JPL-Caltech)

ouvert au Sol 1079 (Figure 9). La roche « Bunsen Peak » est abrasée sur la cible « Castle Geyser » au début de l'après-midi entre 12h36 et 13h00 au Sol 1080 le 4 mars 2024 (Figure 10 et 11). La roche « Bunsen Peak » semble être composé d'environ 75 % de grains de carbonate cimentés ensemble par une matrice de silice presque pure, ce qui atteste de la présence de l'action de l'eau. Grâce au laser ultraviolet de la spectroscopie Raman, l'instrument SHERLOC confirme la présence de carbonates de magnésium hydratés dans les sédiments à la surface de Mars (identifié pour la première fois à « Amherst Point »). Une semaine plus tard, après avoir étudié et analyser la zone d'abrasion avec tous les instruments scientifiques du rover. Une séance de carottage pour collecter un échantillon sur la cible « Comet Geyser » est programmée en fin de l'après-midi entre 14h42 et 15h24 au Sol 1088 le 12 mars2024 (Figure 11). La collecte du 21^{iem} tube contenant un échantillon de roche est une réussite. La roche « Bunsen Peak » doit son nom à un sommet important du parc national de Yellowstone dans le Wyoming aux États-Unis, et « Comet Geyser » est le geyser à cône fritté de

Figure 11 : Campagne à Bunsen Peak

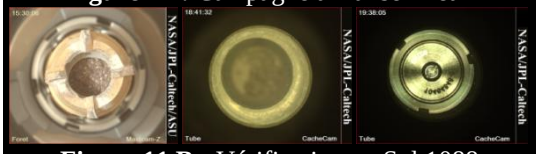


Figure 11 B : Vérification au Sol 1088 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

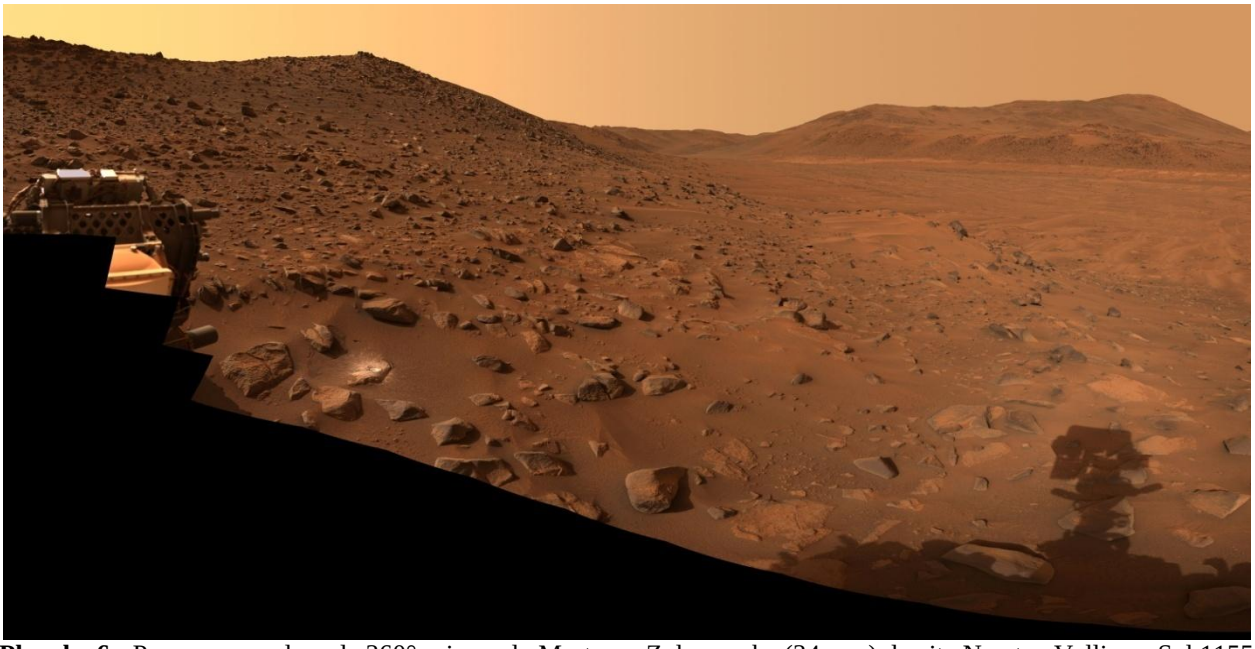


Planche 6 : Panorama couleur de 360° pris par la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Neretva Vallis au Sol 1155 le 20 mai 2024 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 12 : Sol 1110, NavCam de gauche pris vers 15h50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

Figure 13 : Sol 1162, NavCam de droites près de Mount Washburn (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

silice également situé dans le parc national de Yellowstone. Sur les 24 tubes à échantillon collecté par Perseverance durant la mission jusqu'à maintenant, 21 tubes contenaient des carottes de roche, 2 tubes contenaient des échantillons de régolithe, et un tube contenait un échantillon atmosphérique, trois autres tubes parmi le groupe témoins ont également été scellé. Après les vérifications d'usage, le tube no 174 est scellé hermétiquement en début de soirée à 19h30 LMST (Figure 11:B).

L'astromobile reprend la route au Sol 1096 le 20 mars 2024 en se déplaçant vers l'ouest dans le but de trouver un passage à travers le canal fluvial « Neretva Vallis », et durant la séance

Planche 6 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Neretva Vallis au Sol 1155 le 20 Mai 2024 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 14 : Sol 1176, près de Bright Angel (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

Figure 15 : Patch d'abrasion effectué au Sol 1151 (Old Faithful Geyser) et au Sol 1179 (Walhalla Glades) (Crédits : NASA/JPL-Caltech)

de conduite le rover passe la borne du kilomètre 25. En neuf séances de roulement quotidien entre les Sols 1096 et 1110 du 20 mars au 4 avril 2024, Perseverance a parcourus une distance de 387,84 mètres. Un nouveau panorama couleur de 360° est amorcé par la caméra de navigation NavCam de gauche en fin de l'après-midi au Sol 1110 le 4 avril 2024 (Figure 12). L'astromobile franchit le cap de son 26^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars, en longeant le petit escarpement « Beehive Geyser » au Sol 1142 le 7 mai 2024. Deux semaines plus tard désormais positionné à l'entrée de la vallée « Neretva Vallis », le robot entame un nouveau panorama couleur de 360° avec la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) au Sol 1155 le 20 mai 2024 (Planche 6). L'image montre toute la beauté du paysage martien qui englobe le rover à la hauteur de « Overlook Mountain » avec une vue plongeante dans « Neretva Vallis », et dans l'image de gauche nous pouvons voir le patch d'abrasion de teinte plus clair qui a été effectué au Sol 1151 (Old Faithful Geyser). Quatre jours plus tard sur le Sol 1159 le 24 mai 2024, l'astromobile Perseverance en roulant prudemment à travers les ondulations de dunes descend pour la première fois dans l'ancien lit fluvial « Neretva Vallis »

Planche 7 : Panorama couleur de 360° pris par la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Bright Angel Outcrop au Sol 1178 le 13 juin 2024 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

d'environ 400 mètres de large via le colte « Dunraven Pass ». Durant le trajet à travers « Neretva Vallis », le rover prend plusieurs images panoramiques avec ses caméras de navigation NavCam (Figure 13 et 14), et exécute plusieurs séances de brossage sur des cibles de roches carbonatée (Figure 15). Le rocher brillant de teinte blanchâtre parsemé de taches sombres visible près de la ligne d'horizon située au centre de la partie droit de l'image de la figure 13 a été dénommé « Atoko Point ». Il s'agit d'un panorama assemblé à partir de cinq images NavCam de droite qui ont été prises au Sol 1162, et de trois images supplémentaires prises au Sol 1163.

Figure 16 : Campagne à Beaver Falls

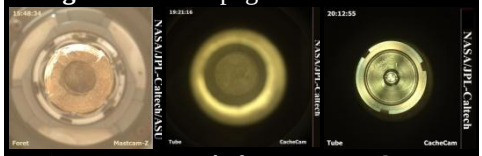


Figure 16 B : Vérification au Sol 1215 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

Perseverance reprend la route au Sol 1168 en roulant vers le nord dans la direction de « Tuff Cliff », puis change de nouveau de direction au Sol 1170 pour se diriger vers l'est en direction de l'affleurement « Bright Angel », un dépôt de remplissage de chenal qui se trouve au pied de « Mont Dauphin ». Il s'agit d'un ensemble d'affleurements rocheux aux tons clairs qui pourraient correspondre à des roches ancienne qui ont été exposée par l'érosion fluviale, ou à des sédiments ayant rempli le chenal. Le solstice d'hiver arrive le 8 juin 2024 (Sol 1173) qui marque également le début d'une nouvelle saison des tempêtes de poussière sur Mars, et sur le même Sol le robot franchit le cap du 27^{iem} kilomètre parcourus sur la planète Mars. Le robot tourne ensuite vers le nord au Sol 1176 pour se déplacer vers la zone de teinte clair dénommée « Bright Angel » (Figure 14), parsemé de roche à la texture étrange rappelant le pop-corn et aux motifs de « taches de léopard » qui est différente de tout ce que le rover avait observé auparavant, avec une abondance de filons et de nodules à leur surface (petites protubérances arrondies dans les roches). Les veines et les nodules se forment lorsque l'eau s'écoule à travers une roche, et les minéraux précipités en solution cristallisent dans les fissures et les espaces vides de la roche. Deux jours plus tard après

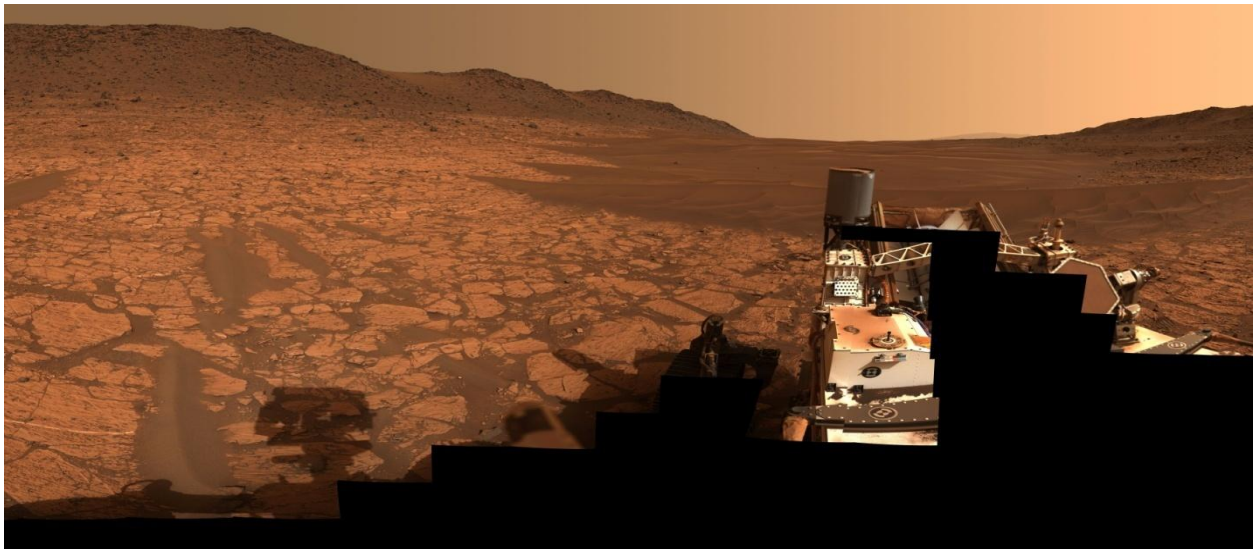


Planche 7 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Bright Angel Outcrop au Sol 1178 le 13 juin 2024 (Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

avoir parcourus une courte distance de 31 mètres, le robot entame un nouveau panorama couleur de 360° avec la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) pour immortaliser le site « Bright Angel Outcrop » au Sol 1178 le 13 juin 2024 (Planche 7). La zone de travail de « Beaver Falls » est située vers le centre de la partie supérieur de l'image de droite.

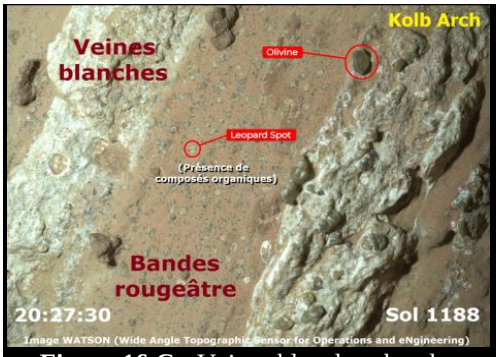


Figure 16 C : Veines blanches, bandes rougeâtre et taches de léopard (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La capacité de spectroscopie Raman et de luminescence de l'instrument SHERLOC reprend du service au Sol 1179 le 14 juin 2024, avec l'observation réussie de la cible d'abrasion dénommée « Walhalla Glades ». La première séance d'abrasion effectuée dans la zone de travail dénommée « Beaver Falls » (Sols 1185-1219) situé à la bordure nord-est de « Bright Angel », est effectuée sur une roche plus sombre dénommée « Fern Glen Rapids » au Sol 1191 après le nettoyage de la surface de la cible baptisée « Steamboat Mountain » (Sols 1185-1195). L'astromobile contourne ensuite le site de travail « Beaver Falls » par le nord-ouest dans le sens horaire entre les Sols 1204 et 1210, dans le but d'aller se positionner devant une roche aux teintes plus claire en forme de pointe de flèche baptisée « Cheyava Falls » (Sols 1210-1219) mesurant 1 mètre sur 0,6 mètre, et de préparer les instruments pour l'exécution de la vingt-cinquième campagne d'échantillonnage de la mission (Figure 16). Durant le trajet le rover a détecté de la silice (opale) en examinant la cible « Elves_Chasm » (Sol 1204). De larges veines blanches de sulfate de calcium parcourent les roches de « Beaver Falls », et entre ces veines se trouvent des bandes de matériau dont la couleur rougeâtre contient de petites taches blanches aux bords sombres (taches de léopard) et des grains d'olivine verte, qui suggère la présence d'hématite. En observant de plus près ses régions rouges sur la roche « Cheyava Falls » au Sol 1188, dans la zone « Kolb Arch » près de la zone ou sera abrasiée plus tard la cible « Apollo Temple ». Perseverance à découvert des dizaines de taches blanc cassé de forme irrégulière de la taille d'un millimètre, chacune entourée d'une matière noire semblable à des taches de léopard (Figure 16:C).

Figure 17 : Sol 1220, caméras de navigation NavCam (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

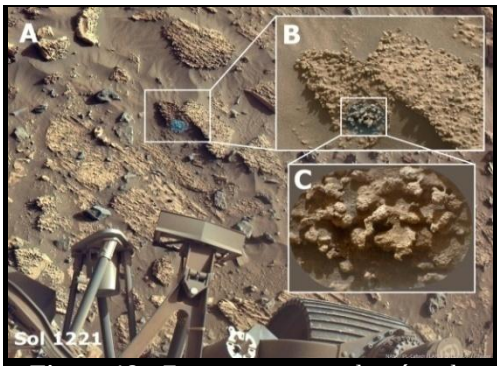


Figure 18 : Zoom sur un conglomérat de galets. Mosaïque combinant des images des caméras NavCam (A), Mastcam-Z (B) et du micro-imager RMI de SuperCam (C) (Crédits : NASA/JPL-Caltech/Franz Tauber)

Pour la première fois dans la mission du rover Perseverance sur Mars, des analyses effectuées dans la bande de matériau noire entourant les taches blanches (taches de léopard) par le spectromètre de cartographie Raman et fluorescence dans l'ultraviolet profond (248,6 nm) de l'instrument SHERLOC (Analyse des environnements habitables par la spectroscopie Raman qui mesure les modes vibrationnels associés aux groupes fonctionnels des composés organiques et la luminescence pour les composés organiques et chimiques), indiquent la présence de molécules organiques complexes[51-52-53]. Ces taches noires contiennent un minéral de fer phosphaté (« Apollo Temple » et « Walhalla Glades ») la vivianite ($Fe_3(PO_4)_2 \bullet 8(H_2O)$) révélé par l'instrument PIXL, et du sulfure de fer la greigite ($Fe^{II}Fe^{III}{}_2S_4$) sur les bords sombres des plus grandes « taches léopard ». Il s'agit d'une caractéristique qui semble indiquer que des réactions chimiques en milieu aqueux mettant en présence ses types de matériaux avec un peut d'eau (environnement hydrothermale), auraient put êtres utilisé comme source d'énergie pour soutenir une forme de vie microbienne. Quatre cibles ont été analysées à « Bright Angel » dans le mudstones situés dans une ancienne vallée fluviale, associé avec des minéraux de carbonates et de sulfates secondaires, tandis qu'une autre roche présente une association d'organique avec une matrice dominée par des silicates primaires. Les cibles sont la surface naturelle dégagée de poussière de « Cheyava Falls », et les cibles d'abrasions « Apollo Temple », « Steamboat Mountain », et « Walhalla Glades ». La campagne de carottage débute avec l'abrasion et le nettoyage de la surface de la roche « Cheyava Falls » sur la cible dénommée « Apollo Temple » au Sol 1211 le 17 juillet 2024, afin de fournir une surface propre pour les différentes analyses qui seront effectuées par les instruments scientifique du robot. Le carottage est exécuté au Sol 1215 le 21 juillet 2024 sur la cible dénommée « Sapphire Canyon ». Et après avoir effectué les procédures de vérification et de validation, le tube numéro 244 contenant l'échantillon est scellé définitivement à 20h05 (LMST) puis ranger dans un espace de stockage (Figure 16:B). La détection de matières organiques par SHERLOC en dehors du cratère « Gale », suggère que les matières organiques n'étaient peut-être pas seulement localisées et pouvaient avoir une plus large disponibilité dans les lacs et rivières anciens de Mars (~3,5 Gyr).

[51] NASA's Perseverance Rover Scientists Find Intriguing Mars Rock, July 25, 2024
[52] Associations minérales et organiques induites par la redox dans le cratère Jezero, Nature 10 septembre 2025
[53] Spatially distributed complex organic matter detected in an ancient river valley in Jezero crater, Mars, Science Advances, 24 Jun 2026, Vol 12, Issue 26

Figure 19 : Malgosa Crest (Crédits : NASA/JPL-Caltech)

Figure 19 B : Les Campagnes d'échantillonnages

L'astromobile reprend ensuite la route vers le sud-ouest au Sol 1219 le 25 juillet 2024, dans le but de retraverser « Neretva Vallis » pour rejoindre la partie de la crête ouest du cratère « Jezero » qui se trouve au sud de la vallée, et de commencer à faire la longue ascension le long du bord intérieur des flancs de la crête ouest du cratère « Jezero ». Sur le panorama de la figure 17, nous pouvons voir l'astromobile qui s'éloigne de l'affleurement « Bright Angel », que l'on retrouve dans la partie supérieure centrale de l'image au pied de « Mont Dauphin ». Une semaine plus tard le 2 août 2024 au Sol 1227 en roulant en direction de « Serpentine Rapids », le rover franchit le cap de son 28^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Perseverance reprend la route vers le sud-ouest et parcours une distance de plus de 574,86 mètres effectué en 8 séances de roulement entre les Sols 1219 et 1231. L'astromobile se positionne ensuite près de « Alsap Butte » pour étudier le terrain jusqu'au Sol 1243, incluant une séance d'abrasion sur la cible « Malgosa Crest », qui se trouve sur l'affleurement rocheux de teinte rouge appelé « Wallace Butte » au Sol 1240 le 16 août 2024 (Figure 19). La zone d'abrasion de 5 cm de diamètre a révélé une étonnante palette de couleurs blanches, noires et vertes dans la roche. L'une des plus grandes surprises a été la présence de taches vert terne, composées de noyaux sombres bordés de vert clair flou. Depuis que l'astromobile Perseverance a fait son entrée dans « Neretva Vallis », le rover a parcourus une distance de plus de 1 777,67 mètres effectué entre les Sols 1158 et 1231. Le trajet combine 34 séances de roulement exécuté en 24 séances de conduite quotidienne sur le sol martien (10 Sols avec deux séances de roulement). La prochaine étape pour le robot est de gravir les pentes abruptes de la crête ouest du cratère « Jezero », et de récolter des échantillons pour une nouvelle campagne (Crater Rim/Bord du Cratère). Il s'agit de la cinquième série de campagne d'échantillonnage qui sera effectuée par Perseverance sur Mars[54-55] (Figure 19:B), après celles du fond du cratère (Crater Floor Campaign : roches ignées apparentées à la pétrogenèse présentant des degrés variables d'altération aqueuse), du front du delta (Fan Front Campaign : sédiments fluviatiles à deltaïques formés par le transport et le dépôt de matériaux provenant de l'extérieur et se déversant dans le bassin du cratère « Jezero » comme « Nili Planum »), du cône supérieur (Upper Fan Campaign : derniers stades d'activité aqueuse au sein de « Jezero ») et de l'unité de marge (Margin Campaign : processus lacustres, littoraux ou ignés qui ont pu se produire au début de l'histoire du cratère)[56].

La formation de carbonates dans l'unité supérieure « Upper Fan » (3–9 % en poids), « Margin Unit » (6–16 % en poids) et « Séítah » (1–3 % en poids) (Figure 20) basée sur les détections fournis par les trois spectromètres de SuperCam (la spectroscopie d'émission atomique induite par laser LIBS, la spectroscopie Raman qui fournit des informations sur les fréquences de vibration et de rotation des liaisons moléculaires, et la spectroscopie de réflectance visible et infrarouge VISIR), semble cohérente avec une carbonatation in situ de matériaux ultramafiques

[54] PNAS : Sampling Mars: Geologic context and preliminary characterization of samples collected by the NASA Mars 2020 Perseverance Rover Mission, September 25, 2024
[55] Plusieurs épisodes d'altération des fluides dans le cratère Jezero indiqués par les identifications minérales MIST dans les données XRF PIXL des 1100 premiers sols de la mission Mars 2020, 11 septembre 2025
[56] Stratigraphie des roches carbonatées à la marge du cratère Jezero, sur Mars : preuve de processus littoraux ? : 6 janvier 2026

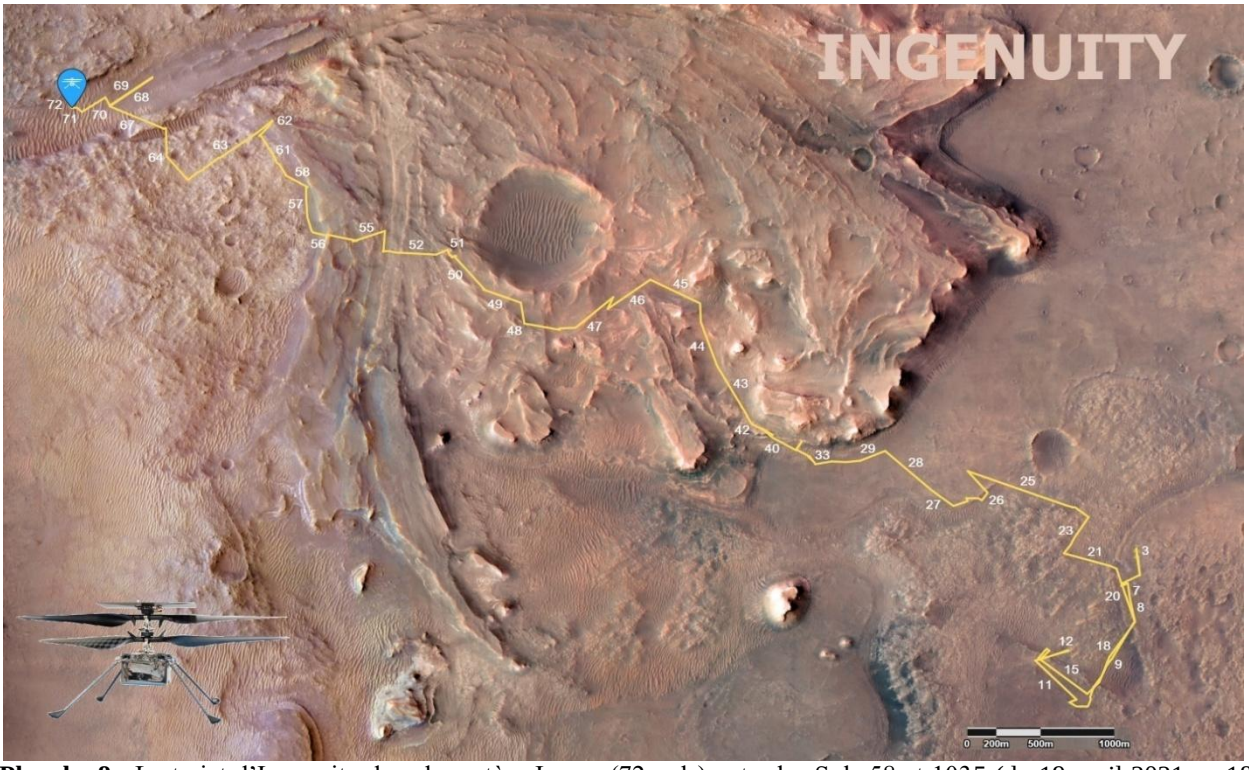


Planche 8 : Le trajet d'Ingenuity dans le cratère Jezero (72 vols) entre les Sols 58 et 1035 (du 19 avril 2021 au 18 janvier 2023). Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[57]. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

exposé à de l'eau du lac ou du chenal de la vallée de la Neretva. Sur Terre, les carbonates sont fréquemment associés à l'olivine, en raison de la faible stabilité de cette dernière et de sa tendance à s'altérer au contact de l'eau, et plus particulièrement des fluides riches en CO_2, Dans l'unité supérieure « Upper Fan » et « Margin Unit », les carbonates sont présents en grande quantité dans les roches à granulométrie relativement grossière : ils sont omniprésents et intimement mélangés à l'olivine et à la silice. Bien que quelques veines de sulfate de calcium et/ou de fluorite (un fluorure de calcium CaF_2) soient localement observées dans les deux unités, aucun carbonate n'a été détecté dans les veines. Ceci exclut un mécanisme de précipitation massive de carbonates à partir de fluides percolant dans les veines. Globalement, la présence généralisée de carbonates et leur coexistence avec la silice sont compatibles avec la transformation de l'olivine en un assemblage de carbonates et de silice selon la réaction générale de carbonatation des roches riches en olivine[58-59]. La carbonatation des roches ultramafiques aurait pu jouer un rôle clé dans l'extraction du CO_2, et par conséquent, dans le refroidissement de l'atmosphère martienne.

Les roches martiennes carbonatées (hydratés) sont des indicateurs clés des interactions passées entre l'eau, la roche et l'atmosphère. Ces minéraux sont essentiels car ils se forment généralement au contact de l'eau liquide et du dioxyde de carbone, agissant comme des

[57] Where is Ingenuity?
[58] In Situ Carbonation of Sedimentary and Igneous Rocks of Ultramafic Composition in Jezero Crater, 24 April 2026
[59] Carbonate Detection With SuperCam in Igneous Rocks on the Floor of Jezero Crater, 14 December 2022

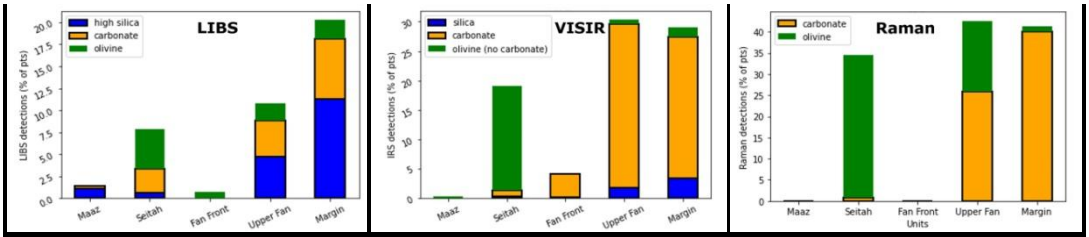


Figure 20 : Abondance d'olivine, de carbonate et de silice dans le substrat rocheux le long de la traversée, basée sur les détections LIBS (en haut), VISIR (au milieu) et Raman (en bas).

Journal of Geophysical Research: Planets Supporting Information for In situ carbonation of sedimentary and igneous rocks of ultramafic composition in Jezero Crater, 24 April 2026 (pdf)

« capsules temporelles » capables de préserver des biosignatures (indices d'un ancien rivage et de vie ancienne) pendant des milliards d'années. Elles conservent des informations détaillées sur le climat ancien et les environnements habitables, et constituent de ce fait une priorité pour l'exploration des missions d'atterrissage sur Mars. Les analyses effectuées avec l'instrument PIXL ont révélé que ces roches contiennent souvent du carbonate mélangé à de l'olivine, un minéral d'origine volcanique. Cette combinaison indique une interaction complexe entre le magma, l'eau et une atmosphère ancienne riche en CO_2. L'instrument SHERLOC a identifié pour la première fois des carbonates de magnésium hydratés directement sur le terrain (Amherst Point, Bunsen Peak)[60], fournissant une preuve cruciale de l'interaction prolongée entre l'eau liquide et le CO_2 atmosphérique il y a environ 3,7 milliards d'années.

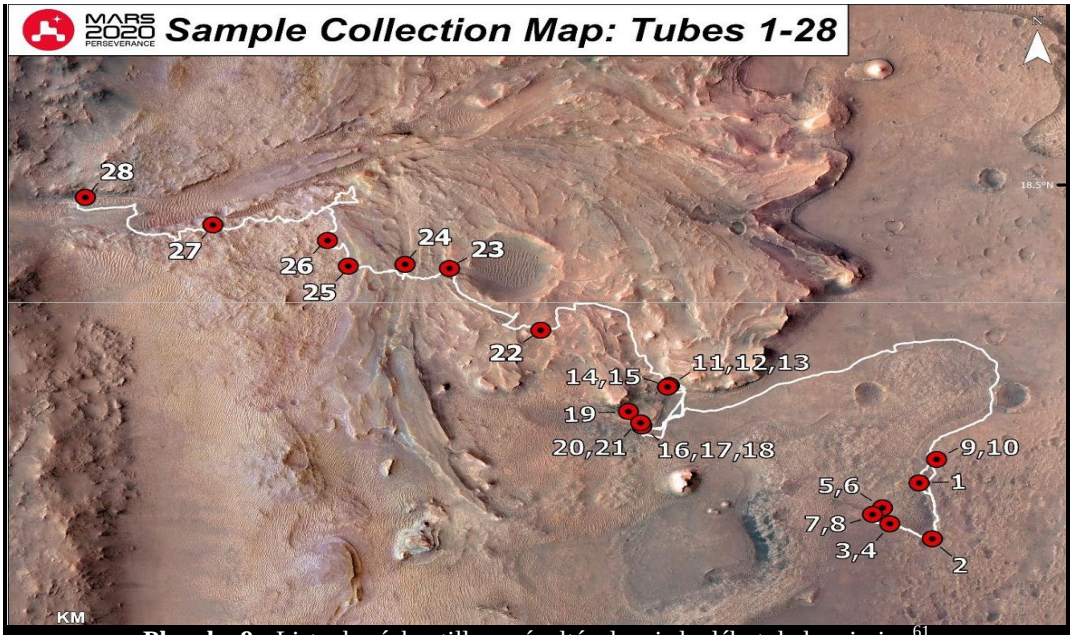


Planche 9 : Liste des échantillons récoltés depuis le début de la mission[61]
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

[60] In Situ Observation of Hydrated Carbonate in Jezero Crater, December 2025
[61] Mars 2020 Initial Reports Volume 4 (Samples 25-28) May 8, 2025

CAMPAGNE DE LA CRÊTE OUEST DU CRETÈRE (Sols 1244 à 1703)

L'aventure se poursuit sur le Sol 1244 le 20 août 2024 avec le début de la campagne d'échantillonnage effectuée sur la crête ouest du cratère « Jezero » (Campagne Crater Rim). Une tempête de poussière saisonnière (début du printemps dans l'hémisphère nord) c'est levée à l'échelle de la région qui masque en grande partie les parois et la cuvette du cratère « Jezero », que l'on peut voir dans la partie supérieure droite du panorama de la figure 2. La campagne du rebord intérieur ouest du cratère a officiellement commencé au Sol 1252, lorsque le rover a commencé à grimper les pentes du rebord intérieur du cratère. La première séance d'abrasion avec étude et analyse prévue par les différents instruments du rover (Mastcam-Z, SuperCam, PIXL, SHERLOC et WATSON) à lieu cinq jours plus tard sur la roche « Specter Chasm » après le nettoyage de la cible « Eremita Mesa » au Sol 1257 le 2 septembre 2024 (Figure 1:A). Après avoir parcourus une distance de 484,63 mètres depuis le Sol 1244 lors de la sortie de « Neretva Vallis », effectué en 11 séances de roulement sur 10 Sols de conduite quotidienne. L'astromobile Perseverance qui est à plus de 300 mètres d'altitude par rapport au site d'atterrissage, arrive au pied de la crête ouest du cratère « Jezero » qui borde le flanc sud du chenal « Neretva Vallis » au Sol 1264. Entre les Sols 1265 et 1283, le robot contourne le flanc sud des parois abruptes de « Dox Castle » qui surmontent les remparts du cratère, afin de rejoindre un accès situé à « Summerland Trail » (Sols 1283-1354) qui permettra de faire l'ascension des pentes jusqu'au sommet de la crête ouest du cratère. Et durant le trajet, l'astromobile franchit le cap de son 29^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 1268 le 13 septembre 2024, et a fait la rencontre d'une roche étrange et unique en son genre sur Mars dénommée

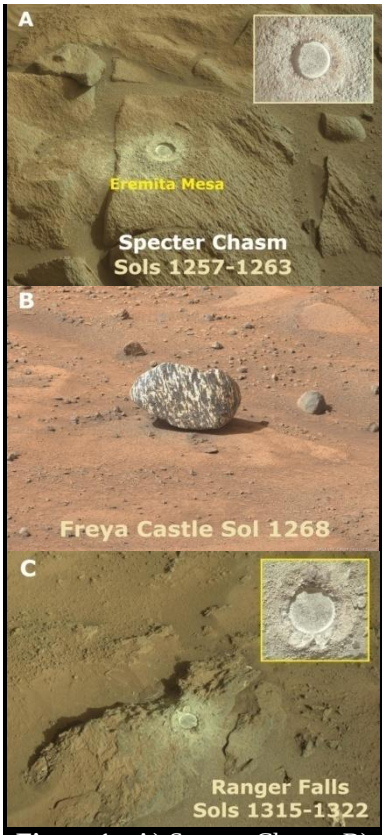


Figure 1 : A) Specter Chasm, B) Freya Castle et C) Ranger Falls (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Figure 2 : Sol 1298, Curtis Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

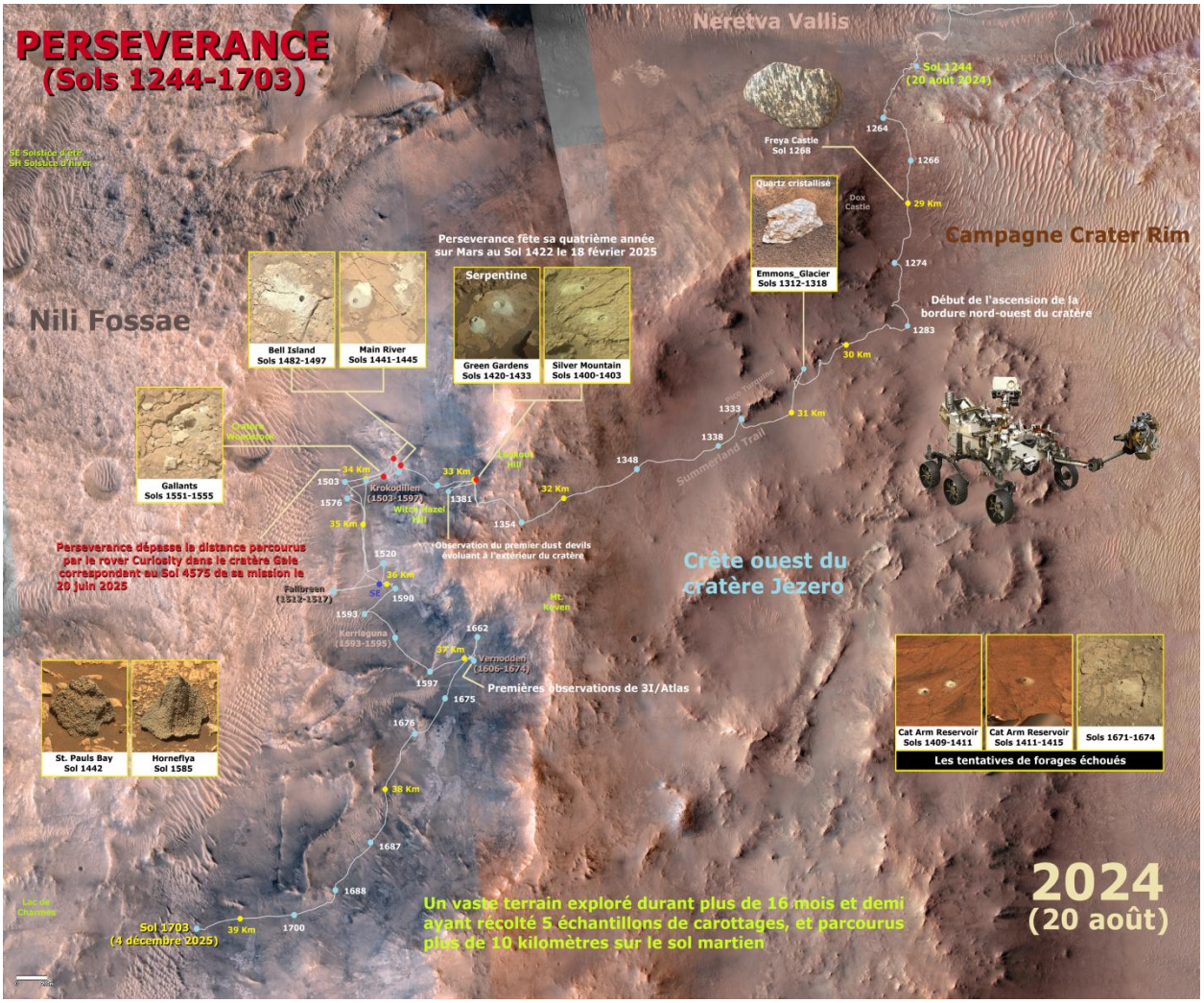


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 1244 et 1703, du 20 août 2024 au 4 décembre 2025. Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[62]. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

« Freya Castle » d'environ 20 cm de diamètre, qui présente un motif saisissant de rayures noires et blanches alternées (Figure 1:B).

Après avoir effectué une séance de science de proximité sur surface naturelle à « Goat Island Rock » (Sols 1281-83), le rover reprend la route vers le sud-est en parcourant 176,22 mètres en deux Sols. Perseverance entame ensuite l'ascension des pentes en longeant une entaille en forme de rampe situé au pieds des parois abrupte à travers un paysage montagneux a partir du Sol 1284 (« Summerland Trail »), et après avoir parcourus 344,95 mètres en six séances de roulement, l'astromobile franchis la borne du 30^{iem} kilomètre parcourus sur la planète Mars au Sol 1293 le 9 octobre 2024 à la hauteur de « Saint Elmo Pass ». Le rover parcours ensuite une distance de 180,67 mètres exécutées en trois séances de conduite jusqu'au Sol 1298, puis en début de l'après-midi vers les 13h50 le robot entame un nouveau panorama couleur avec ses caméras de navigation (NavCam) à la hauteur de « Curtis Ridge » (Figure 2). Nous pouvons voir

[62] Where is Perseverance?

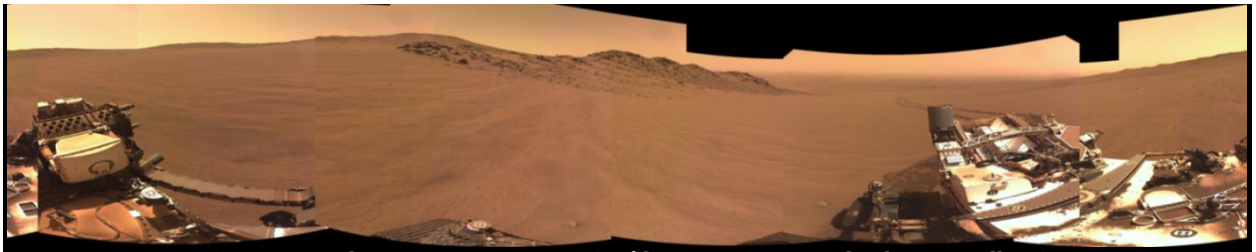
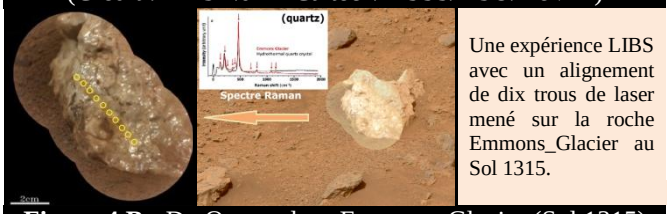


Figure 3 : Sol 1327, Pico Turquino (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

la vallée de Neretva (« Neretva Vallis ») situé en contre bas dans la moitié supérieure droite de l'image, en suivant les traces de roues laissées sur le sol martien. Le rover arrive ensuite au pied du substrat rocheux sombre « Mist Park » (Sols 1311-1318), et rencontre une série de roches flottantes de couleur blanche aux compositions chimiques et minéralogiques très inhabituelles au Sol 1312 le 28 octobre 2024 (Figure 4), semblable aux roches blanche contenant du soufre pur rencontrée par Curiosity à « Gediz Vallis Channel » au Sol 4200 de sa mission. Ces roches flottantes gris clair riches en silice (quartz) témoignent d'interactions eau-roche remontant aux tout débuts de l'histoire de Mars. Cette découverte publiée cinq mois plus tard le 28 février 2025[63], a été faite par une équipe scientifique internationale utilisant la suite instrumentale de SuperCam en combinant les spectroscopies VISIR (visible/proche infrarouge), Raman (spectres de réflectance infrarouge) et LIBS (spectroscopie de claquage induit par laser). Les spectres Raman de SuperCam sont obtenus en moyenne grâce au signal de 400 tirs laser pour chaque point analysé sur les cibles de roche. SuperCam a identifié des roches flottantes exceptionnellement riches en silice dans cette zone de travaille (Emmons_Glacier, AEGIS_1331B, Margaret_Falls et Owyhigh_Lakes). Trois formes de silice ont jusqu'à maintenant été identifier par SuperCam sur Mars. Soit la calcédoine au Sol 910 (AEGIS_910A) et l'opale au Sol 1204 (« Elves_Chasm ») détecté par la spectroscopie infrarouge VISIR de SuperCam, et maintenant le quartz parfaitement cristallisé (« Emmons_Glacier ») identifier par la spectroscopie de réflectance infrarouge Raman de SuperCam. Bien que le quartz soit commun dans la croûte terrestre, c'est la première fois que ce minéral est directement identifié à la surface de Mars.

Figure 4 : Champ de roche blanche composée de quartz (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU/NeV-T)



Une expérience LIBS avec un alignement de dix trous de laser mené sur la roche Emmons_Glacier au Sol 1315.

Figure 4 B : Du Quartz dans Emmons_Glacier (Sol 1315) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU)

La silice hydratée se forme généralement à partir d'une exposition prolongée des roches silicatées à une eau abondante. La dissolution et la précipitation de la silice suggèrent l'existence possible de processus hydrothermaux, fréquents sur Terre à proximité des bords des cratères d'impact. L'énergie libérée par la formation du cratère et la déformation associée fournissent de la chaleur, favorisant la circulation des fluides au sein des roches fracturées. Les roches siliceuses, en particulier l'opale, possèdent des capacités remarquables à préserver des traces de vie, qu'elles soient morphologiques ou moléculaires. L'observation de traces d'un ancien système

[63] Earth and Planetary Science Letters, le 28 février 2025

Planche 2 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Rio Chiquito avec la partie ouest de Pico Turquino au Sol 1337 le 23 novembre 2024. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

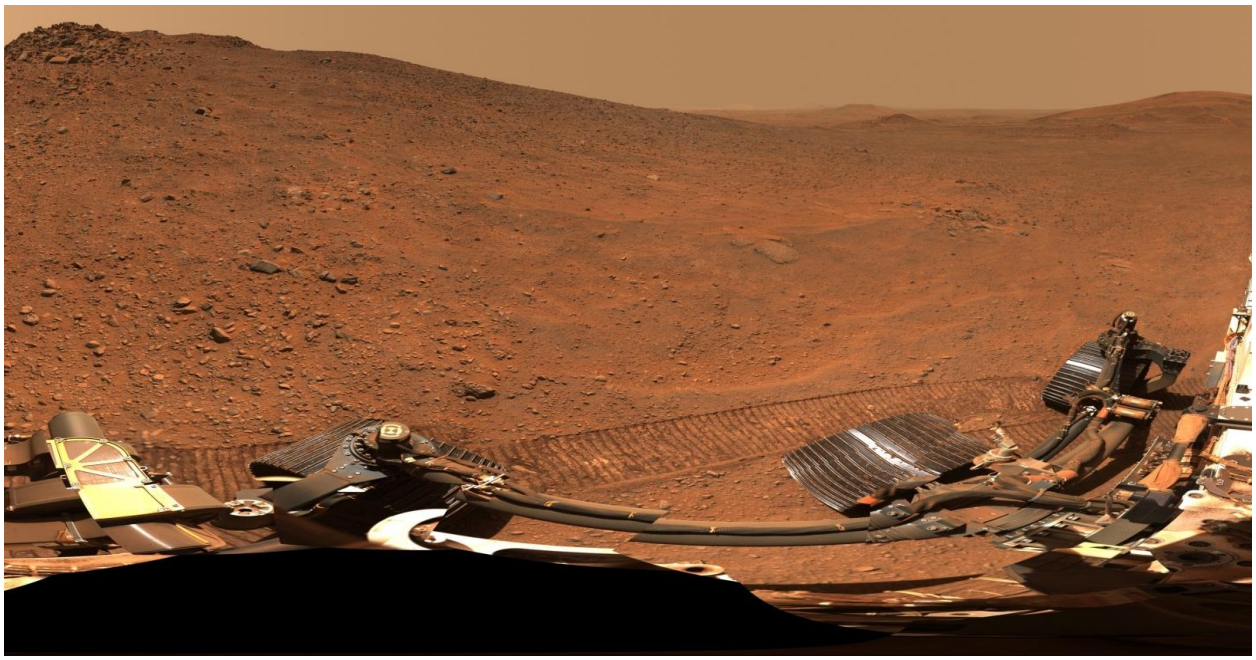


Planche 3 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm). Vue haute résolution depuis la crête du cratère Jezero à Lookout Hill entre les Sols 1356-1358 du 13 au 15 décembre 2024. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

hydrothermal lié à un cratère d'impact à la surface de Mars est particulièrement remarquable, car les environnements hydrothermaux comptent parmi les principales cibles de la recherche de vie microbienne dans le système solaire. La surface de Mars est couverte de cratères d'impact, ce qui rend très probable que des environnements similaires aient été autrefois courants sur la planète rouge ajoute Lucia Mandon, chercheuse postdoctorale au Centre national d'études spatiales (CNES), également chercheuse à l'IPAG.

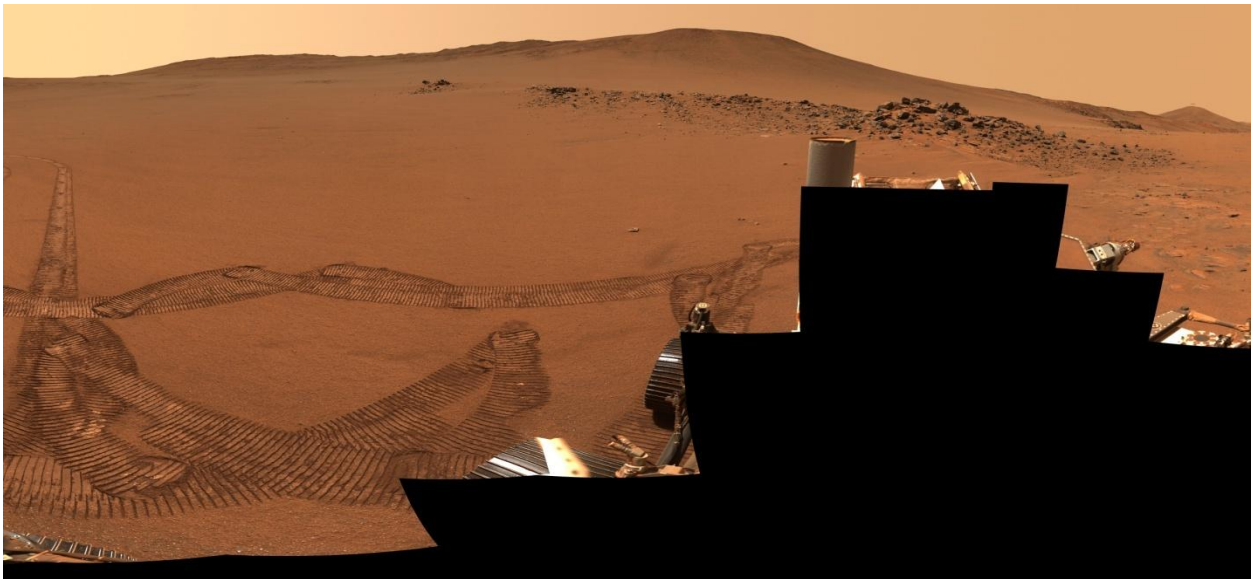


Planche 2 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Rio Chiquito avec la partie ouest de Pico Turquino au Sol 1337 le 23 novembre 2024. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

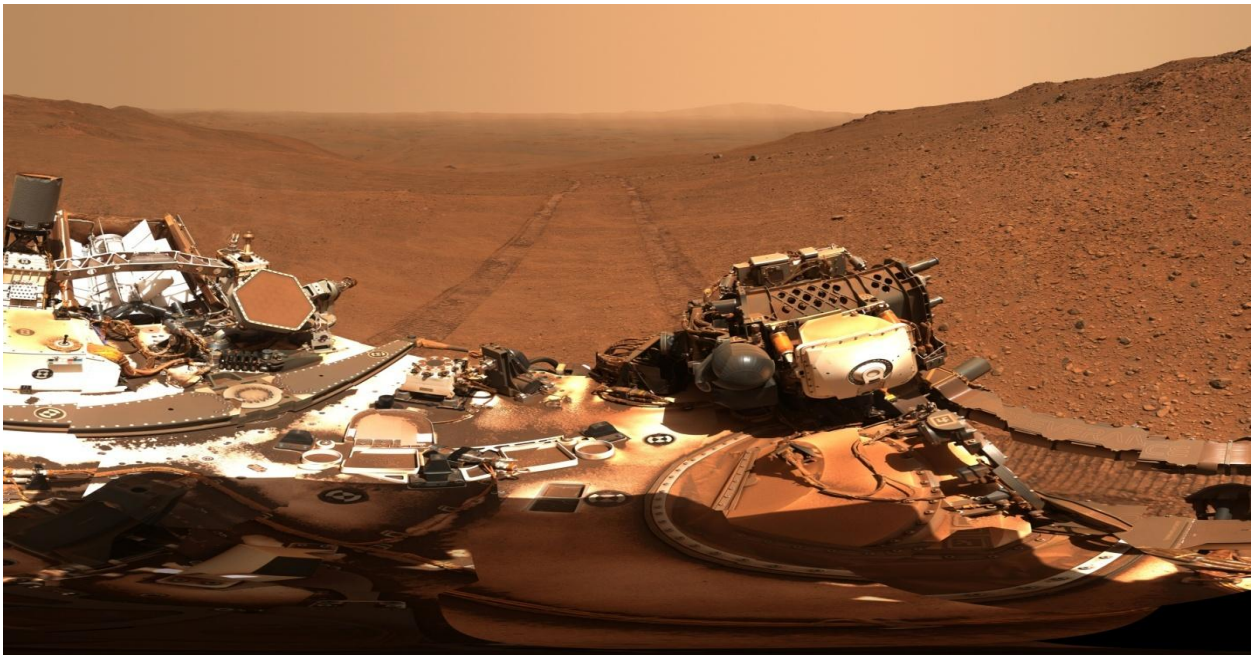


Planche 3 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm). Vue haute résolution depuis la crête du cratère Jezero à Lookout Hill entre les Sols 1356-1358 du 13 au 15 décembre 2024. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

L'astromobile entame ensuite une séance d'abrasion sur la cible de roche « Ranger Falls » au Sol 1315 le 31 octobre 2024 (Figure 1:C), avant de reprendre la route vers sud-ouest au Sol 1318 en direction de l'escarpement « Eagle Cliff ». Entre les Sols 1322 et 1333 du 8 novembre au 9 décembre 2024, le rebot contourne l'escarpement « Pico Turquino » d'environ 200 mètres de long par le sud-ouest, et durant le trajet l'astromobile franchit le cap de son 31^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 1324, et a monté un nouveau panorama couleur

Figure 5 : Rio Chiquito (NASA/JPL-Caltech/ASU)

des environs avec ses caméras de navigations (NavCam) au Sol 1327 (Figure 3). L'astromobile s'arrête à l'extrémité sud-ouest de l'escarpement « Pico Turquino », le temps de faire une nouvelle étude détaillée de terrain incluant une séance d'abrasion sur l'affleurement « Rio Chiquito » entre les Sol 1334-1338 (Figure 5, et en bas au centre de l'image de gauche de la Planche 2). Avant de reprendre la route vers le sud-ouest au Sol 1338, pour se diriger vers les prochaines étapes géologiques importantes se trouvant près des collines appelée « Lookout Hill » (801 mètres d'altitude par rapport au site d'atterrissage) et « Witch Hazel Hil » (712 mètres), qui marque la limite ou se trouve le sommet de la crête ouest du cratère « Jezero » situé 250 mètres plus haut. Perseverance entame un nouveau panorama couleur de 360° avec la caméra Mastcam-Z de gauche au milieu de l'après-midi vers les 13h44 au Sol 1337, l'image dévoile le magnifique paysage montagneux martien se trouvant à la hauteur de « Rio Chiquito » (Planche 2). Vers le centre de la partie supérieur de l'image de gauche du panorama, nous avons une vue plongeante sur le delta du cratère « Jezero » avec « Neretva Vallis » à gauche, suivie du cratère « Belva » et de la butte « Kodiak » à droite. Et vers le centre de l'image de droite du panorama, nous retrouvons le sommet « Lookout Hill », qui est le plus haut sommet de cette partie de la crête ouest du cratère « Jezero ». Perseverance fête également son deuxième anniversaire martien sur le Sol 1338 le 24 novembre 2024. Le rover gravi des pentes raides et franchit une distance de 936,92 mètres effectuées en 7 séances de conduite quotidienne entre les Sol 1338 et 1351, ou le robot franchit le cap du 32^{iem} kilomètre vers la fin de la dernière séance de roulement.

Le rover parcours 246,75 mètres au Sol 1354 le 11 décembre 2024 avant de s'imobilisé entre les petites buttes « Los Corales » et « Avalanche Spire », et qui sera la distance de conduite la plus longue exécutée sur un même Sol en faisant l'ascension des pentes le long du bord intérieur du cratère « Jezero ». Depuis le début de l'ascension des pentes intérieur de la crête nord-ouest du cratère amorcée sur le Sol 1284, le rover a gravis près de 375 mètres en 70 Sols à lequel il faut ajouter 410 mètres de dénivelée supplémentaire effectué entre les Sols 1-1284, pour un totale de 785 mètres de dénivelée. Le rover atteint finalement le sommet « Lookout Hill », qui marque la limite supérieure de cette partie de la crête ouest du cratère, et s'arrête à la hauteur de « Salmon Point » jusqu'au Sol 1358. Durant environ trois mois et demi le rover à gravi 500 mètres de dénivelé avec des pentes de plus de 20 %, s'arrêtant en chemin pour faire des observations scientifiques. Deux jours plus tard le 13 décembre 2024 (Sol 1356), l'instrument SHERLOC à bord du rover Perseverance a rencontré un problème majeur, une défaillance du moteur de l'instrument a rendu le cache anti-poussière et le mécanisme de mise au point automatique de la caméra de contexte autofocus (ACI) inopérants, compromettant ainsi la capacité de spectroscopie Raman SHERLOC du rover. Le robot en profite également pour monter un nouveau panorama couleur de 360° pris à l'aide de la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) entre les Sols 1356 et 1358, du 13 au 15 décembre 2024 (Planche 3). L'image est une vue haute résolution pointant vers le sommet « Lookout Hill », qui est le point les plus haut des environs s'élevant à plus de 800 mètres d'altitude par rapport au site d'atterrissage, et qui représente plus de 100 mètres d'affleurement stratifié où chaque couche est comme une page de l'histoire martienne.

L'astromobile se déplace vers le nord-ouest et parcours une distance de 151,39 mètres sur le Sol 1359, avant de s'arrêter devant un nouveau site d'intérêt géologique situé dans la région « South Arm » (Bras Sud), constitué de roches ignées et métamorphiques très anciennes.

Figure 6 : Cat Arm Reservoir (NASA/JPL-Caltech/ASU/Paul Hammond)

Perseverance se positionne près du site de l'affleurement rocheux « Cat Arm Reservoir », première roche rencontrée au sommet de la colline « Witch Hazel Hill ». Sur le Sol 1360 le 17 décembre 2024, le rover entame une séance d'abrasion sur l'affleurement « Cat Arm Reservoir » (Sols 1360-1362) et l'étudie jusqu'au Sol 1362 (Figure 6). Il s'agit d'une zone qui contient des affleurements de roches ignées (provenant du magma) et des minéraux qui témoignent d'une altération par l'eau datant de milliards d'années. Le robot se déplace ensuite vers le nord et parcours une distance de 111,78 mètres entre les Sols 1362 et 1363, en roulant sur une pente descendante qui donne accès pour la première fois vers les régions extérieur du cratère et sur la vaste étendue fracturée inconnue de « Nili Planum » (voir la Planche 4 qui sera prise plus tard sur le Sol 1399 avec une vue plongeante donnant pour la première fois directement sur les régions extérieur du cratère), dans le but de rejoindre l'affleurement « Shallow Bay » qui se trouve entre les collines « Witch Hazel Hill » et « Lookout Hill ». L'objectif est de rejoindre le site de travail avant la période de vacance des fêtes, qui aura lieu entre les Sols 1363 et 1380 du 20 décembre 2024 au 6 janvier 2025, ou le rover va exécuter une liste d'activité simplifiée de deux à trois Sols préprogrammée d'avance et télécharger dans sa mémoire. L'astromobile situé dans la partie la plus élevée de « Witch Hazel Hill », a utilisé son outil de meulage pour effectuer une séance d'abrasion sur la cible « Blue Hill », qui se trouve près du site des affleurements rocheux de ton clair de quelques mètres d'étendu baptisée « Shallow Bay » au Sol 1375 le 1er janvier 2025 (Figure 8), et exécute par la suite différents protocoles d'étude et d'analyse préprogrammée jusqu'au Sol 1380 avec les différents instruments scientifiques du rover (Mastcam-Z, SuperCam, PIXL, SHERLOC et WATSON).

Le peu de précipitations observées dans la région de Los Angeles en Californie entre l'été 2024 et janvier 2025, fait craindre le pire pour les incendies de forêt. Une détérioration des conditions des principaux brasiers en activités le 3 janvier 2024 (Pacific Palisades et Eaton), provoque de violents incendies qui font des dégâts importants. L'incendie d'Eaton s'est déclaré dans les collines d'Eaton Canyon près d'Altadena dans la soirée du 7 janvier, forçant environ 200 000 personnes à quitter leurs maisons, dont plusieurs centaines d'employés du JPL. Le Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA à Pasadena est menacé, forçant l'institution à évacués le personnel le 8 janvier. Le laboratoire lui-même n'a pas été endommagé, et les employés ont maintenu l'institution vieille de 88 ans en activité avec un service réduit tout au long de la catastrophe. Environ 150 employés du JPL ont perdu leur maison dans l'incendie. Une fois les incendies sous contrôle autour du 31 janvier, l'activité du JPL a repris normalement.

Figure 7 : Steve's Trail (NASA/JPL-Caltech/ASU/Paul Hammond)

Durant cette période, l'astromobile exécute une longue boucle d'exploration du terrain vers le sud-ouest entre les Sols 1380 et 1397 du 6 au 24 janvier 2025, en parcourant 290,53 mètres effectuées en trois séances de roulement quotidiens vers la colline « Witch Hazel Hill », avant de revenir sur ses pas. Durant le trajet près du site dénommé « MillBrook », le robot profite de l'occasion pour nettoyer la surface d'un affleurement grâce à son outil de dépoussiérage à gaz (gDRT), et d'effectuer une séance d'abrasion (meulage) au Sol 1395 sur la cible baptisée « Steve's Trail » (Sols 1395-

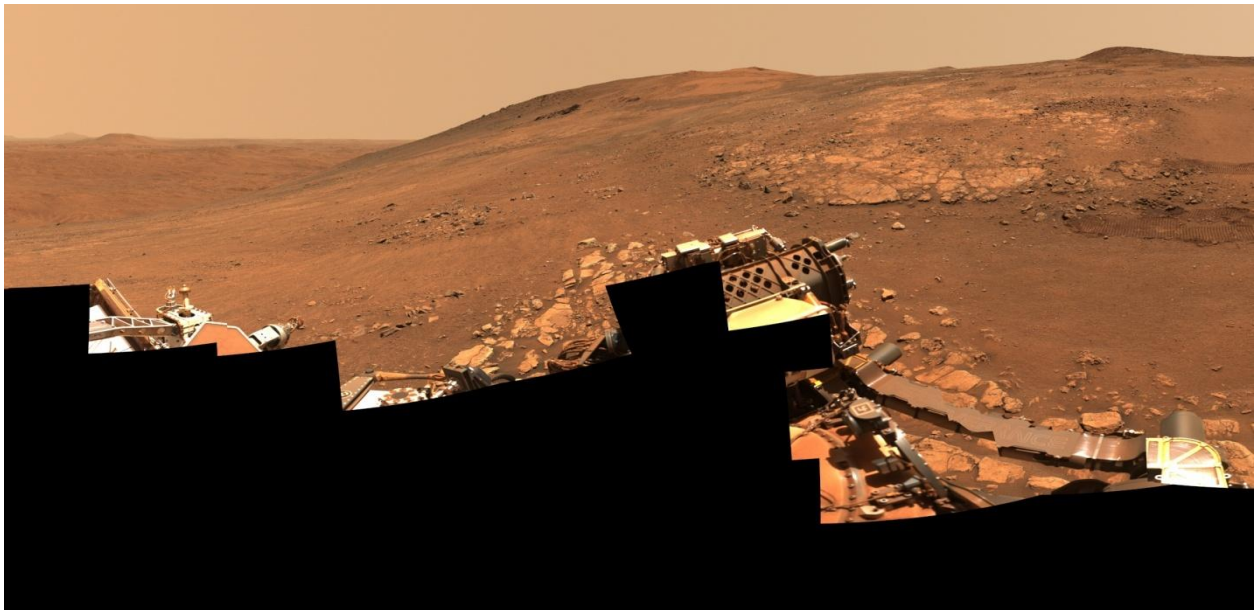


Planche 4 : Panorama couleur de 360° de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Trout River/Shallow Bay au Sol 1399 le 26 janvier 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 8 : Campagne à Shallow Bay

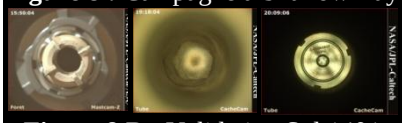


Figure 8 B : Validation Sol 1401 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

97) au début de l'après-midi à 12h59 (Figure 7), permettant ainsi aux instruments de télédétection d'effectuer une analyse avant/après de la surface rocheuse. Mais lors de la séance d'abrasion la roche s'est brisée rendant l'emplacement inutilisable, la roche étant rendue trop instable et dangereuse pour exécuté une séance de carottage. L'instrument SuperCam (SCAM) a utilisé ses systèmes LIBS et VISIR pour étudier la cible « Bad Weather Pond », tandis que Mastcam-Z (ZCAM) a photographié l'ensemble de la zone de travail. Ces observations fournissent des données précieuses sur la composition, la texture et l'altération potentielle de ces roches. Après avoir terminé sa mission à « MillBrook », incluant un balayage multispectral ZCAM de « Berry Hill ». Perseverance reprend la route vers le nord-est au Sol 1397 et franchis une distance de 138,52 mètres pour s'approcher de nouveau du site d'affleurements rocheux « Shallow Bay », un site d'un immense intérêt scientifique que le rover à déjà visité entre les Sols 1375 et 1380. Sur le Sol 1398 le 25 janvier 2025, le rover a observé pour la deuxième fois l'évolution de plusieurs dust devils se déplaçant à l'extérieur du cratère « Jezero » à travers « Nili Planum » à environ 1 kilomètre de distance (Figure 28 à la fin de ce chapitre). Plusieurs images ont été prises par l'une des caméras de navigation du rover, pour former une courte séquence vidéo composée de 21 images prises à environ 6 secondes d'intervalle. Le plus grand tourbillon de poussière mesurait environ 65 mètres de large et au moins 400 mètres de haut, se déplaçant à environ 1 mètre par seconde vers l'ouest-nord-ouest. Le plus petit tourbillon de poussière qui suivait, mesurait environ 5 mètres de large et était à peu près de la même hauteur, il se déplaçait un peu vite lorsqu'il a été aspiré par le tourbillon plus important. Deux autres tourbillons de poussière peuvent êtres vus à l'arrière-plan gauche vers le centre de l'image. Perseverance a enregistré la scène alors qu'il explorait le bord ouest du cratère « Jezero » à un endroit appelé « Witch Hazel Hill ». Les premier dust devils évoluant au loin à l'extérieur du cratère avaient été observé sur le Sol 1381.

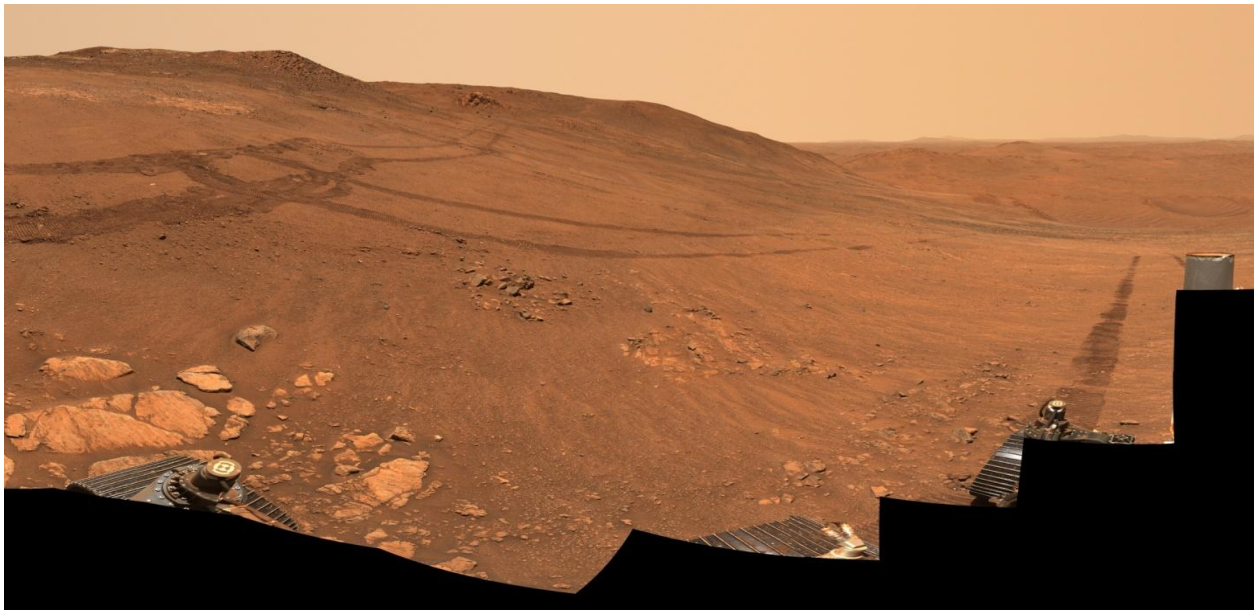


Planche 4 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Trout River/Shallow Bay au Sol 1399 le 26 janvier 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 9 A : Campagnes ratées à Serpentine Lake

(Crédit : NASA/JPL-Caltech & image du haut Paul Hammond)

Les roches de cet endroit sont riches en pyroxène, un minéral présent dans presque toutes les roches ignées et métamorphiques à faible teneur en calcium, ce qui en fait l'une des cibles d'échantillonnage les plus intrigantes de la mission jusqu'à présent. Revenue à sa position de départ, Perseverance entame la 26^{iem} campagne de carottage sur un affleurement se trouvant dans la zone de « Shallow Bay », ou le robot avait effectué l'abrasion de la cible de roche « Blue Hill » entre les Sols 1375 et 1380. Le premier carottage pour une collecte d'échantillon effectué sur le versant nord-ouest de la crête, donnant vers les régions extérieur du cratère, est exécuté au Sol 1401 le 28 janvier 2025 (Figure 8) sur la cible riche en pyroxène baptisée « Silver Mountain » (Sols 1400-1403). La tache d'abrasion « Blue Hill » est également visible sur la Planche 4, il s'agit de la tache claire située vers le centre de la partie droite de l'image de gauche entre les pics de « Lookout Hill » en haut à gauche et de « Witch Hazel Hill » à droite. Et après avoir effectué la validation des échantillons contenue dans le tube, grâce à la caméra embarquée CacheCam du système de mise en cache des échantillons située sous le rover. Dont la tâche est d'observer le haut du tube pour prendre des gros plans du matériau échantillonné et du tube pendant sa préparation, Le tube no 283 est scellage définitivement et placé dans un espace de stockage à 19h36 (LMST: heure locale de Mars). La cible de roche et ses environs sont ensuite étudié et analysé avec les différents instruments scientifiques de proximité de l'astromobile (PIXL, SHERLOC et WATSON) jusqu'au Sol 1403. Il s'agit du premier échantillon de substrat rocheux ancien prélevé sur le bord

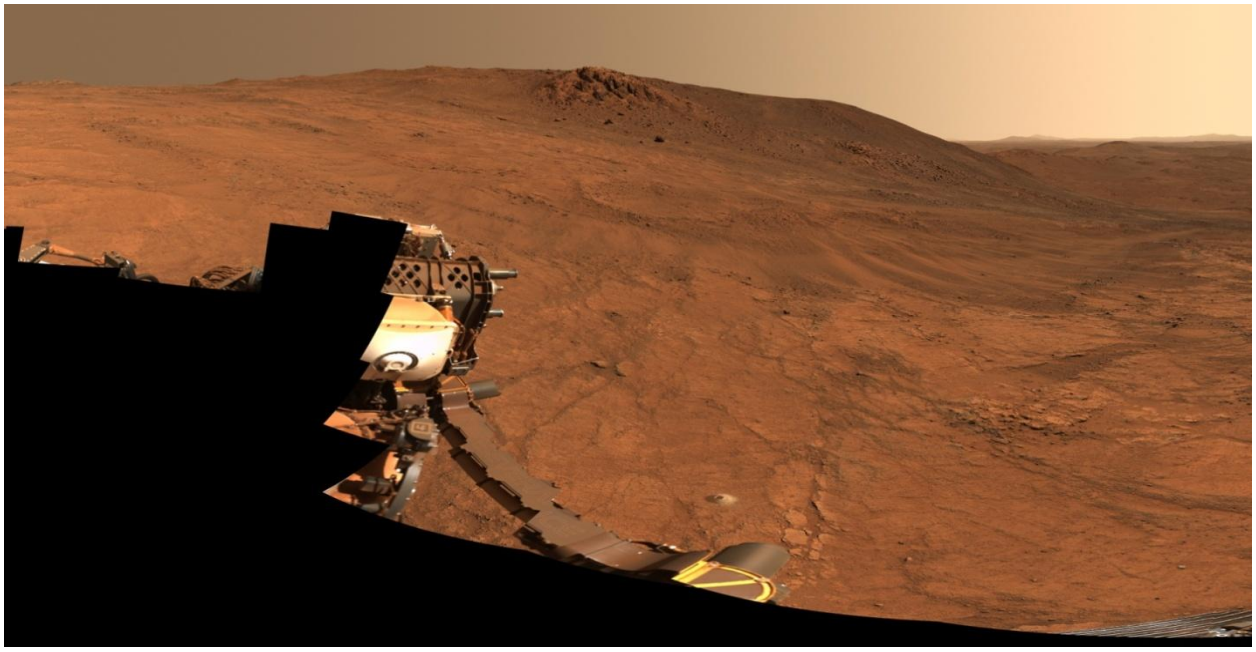


Planche 5 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site South Arm au Sol 1412 le 8 février (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

du cratère « Jezero » dans la région de la colline « Witch Hazel Hill », une étape importante dans la mission visant à découvrir l'histoire géologique du cratère et un trésor unique pour les futures analyses lors du retour des échantillons sur Terre avec la mission de Mars Sample Return (prévu au alentour de 2030).

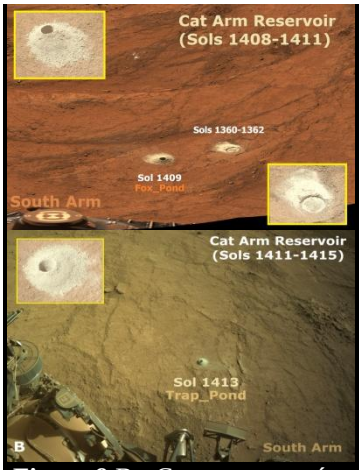


Figure 9 B **:** Campagnes ratées A) Extrait de la Planche 5 B) NASA/JPL-Caltech/Paul Hammond)

L'astromobile se déplace d'environ 7 mètres vers le nord-ouest pour se positionner devant un nouvel affleurement dénommé « Tablelands » (Sols 1404-1406), et amorce une nouvelle séance d'abrasion sur la cible de roche de teinte vert pâle baptisée « Serpentine Lake » au Sol 1404 (Figure 9:A). Après l'étude des résidus de la roche au Sol 1406, dont les premières analyses ont révélé une forte présence de serpentine, le robot exécute un nouveau déplacement en forme de boucle orienté cette fois-ci vers le sud entre les Sols 1407 et 1415, et franchit une distance de 236,49 mètres effectué en 4 séances de conduite quotidienne. Le premier déplacement est effectué au Sol 1407 sur une distance de 106,16 mètres, suivis le lendemain d'un court déplacement de 10,82 mètres pour se diriger de nouvau vers la zone de travail « South Arm ». Le robot se place pour une deuxième fois devant la zone d'affleurement « Cat Arm Reservoir » (Sols 1408-1411). Une séance de carottage est effectuée au Sol 1409 (5 février 2025) sur la cible « Fox_Pond » (Sols 1408-1411), qui se trouve près du patch d'abrasion qui a été fait au Sol 1360, mais après vérification le tube est resté vide (Figure 9:Ba, et en bas à droite sur la Planche 5), la roche c'est avérée trop friable et qui s'est désagrégée lors du forage. L'astromobile se déplace sur une courte distance de 9,97 mètres vers le sud-est au Sol 1411, afin de rejoindre un nouvel affleurement se trouvant à proximité du premier pour réessayer une nouvelle séance de carottage au Sol 1413 sur la cible « Trap_Pond » (Sols 1411-1415). Cependant, le tube d'échantillonnage numéro 060 s'est avéré vide pour une

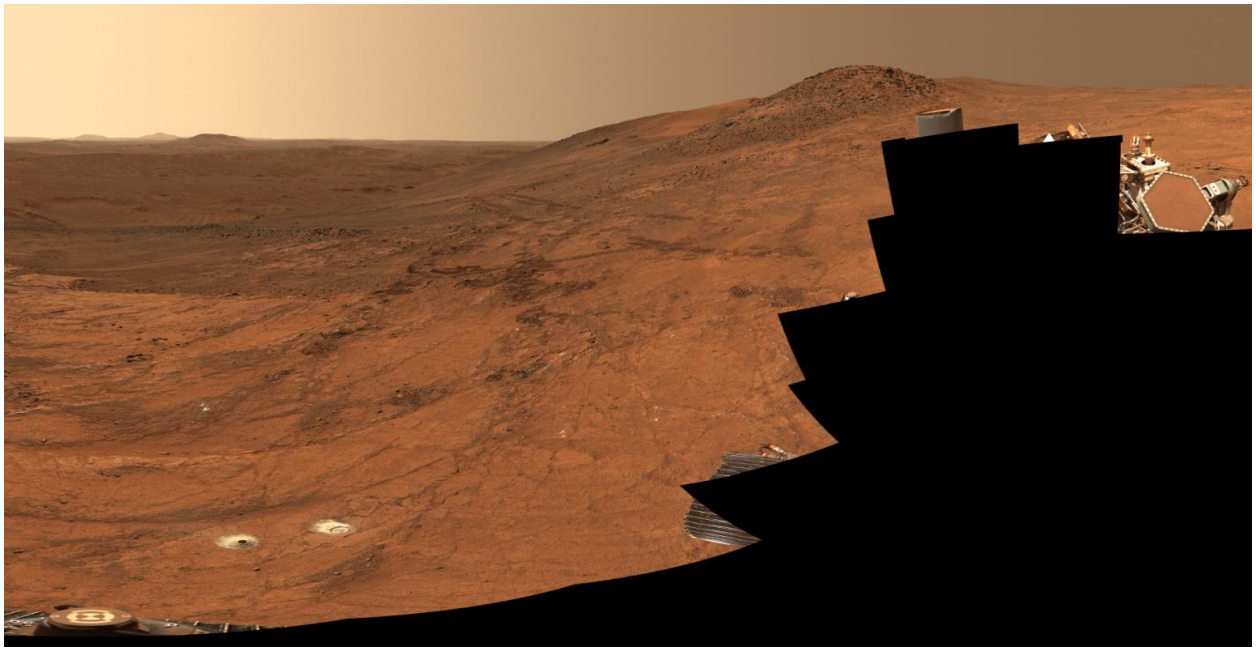


Planche 5 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site South Arm au Sol 1412 le 8 février (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

deuxième fois (Figure 9:Bb, et en bas à gauche sur la Planche 5). Ce n'est pas courant, mais il arrive que les roches échantillonnées soient si fragiles qu'elles se désintègrent en poudre au lieu de rester dans le tube. Une roche mal cimentée pourrait être fragmentée en petits fragments lors du carottage. Les fragments pourraient rester dans le trou ou tomber du tube pendant que la foreuse est orientée en position horizontale pour placer le trépan et le tube d'échantillonnage dans le carrousel, en vue du transfert du tube dans la cache afin de réaliser des mesures et des images de validation du contenue avant le bouchage définitif du tube.

Le rover reprend la route vers le nord au Sol 1415 en parcourant une distance de 109,54 mètres et de 17,93 mètres au Sol suivant, dans le but de rejoindre à nouveau la zone des affleurements « Tablelands » (Sols 1416-1429). Lors du dernier déplacement effectué au Sol 1416, le rover a franchit le cap de son 33^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Il s'agit d'un affleurement riche en serpentine (phyllosilicates) rencontrée pour la première fois au Sol 1404. La 27^{iem} campagne d'échantillonnage et de carottage de la mission est effectuée sur la cible « Green Garden » au Sol 1420 le 17 février 2025 (Figure 10), mais après vérification il avait trop d'échantillon pour fermer le tube numéro 041, deux autre tentatives pour fermer le tube ont également échouées (Sol 1423 et 1427). Entre temps le rover Perseverance fête son quatrième anniversaire à explorer la surface martienne au Sol 1422 le 18 février 2025. La séance de carottage de l'affleurement « Tablelands » s'est déroulé sans problème, mais le scellement du tube est devenu un défi technique. Cela se produit lorsqu'il y a trop de roche en poudre au sommet du tube pour empêcher une étanchéité parfaite. Cette difficulté s'est déjà

Figure 10 : Campagne à Tablelands

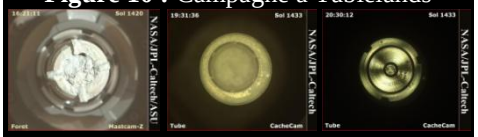


Figure 10 B : Validation Sols 1420-33
(NASA/JPL-Caltech/ASU & Paul Hammond)

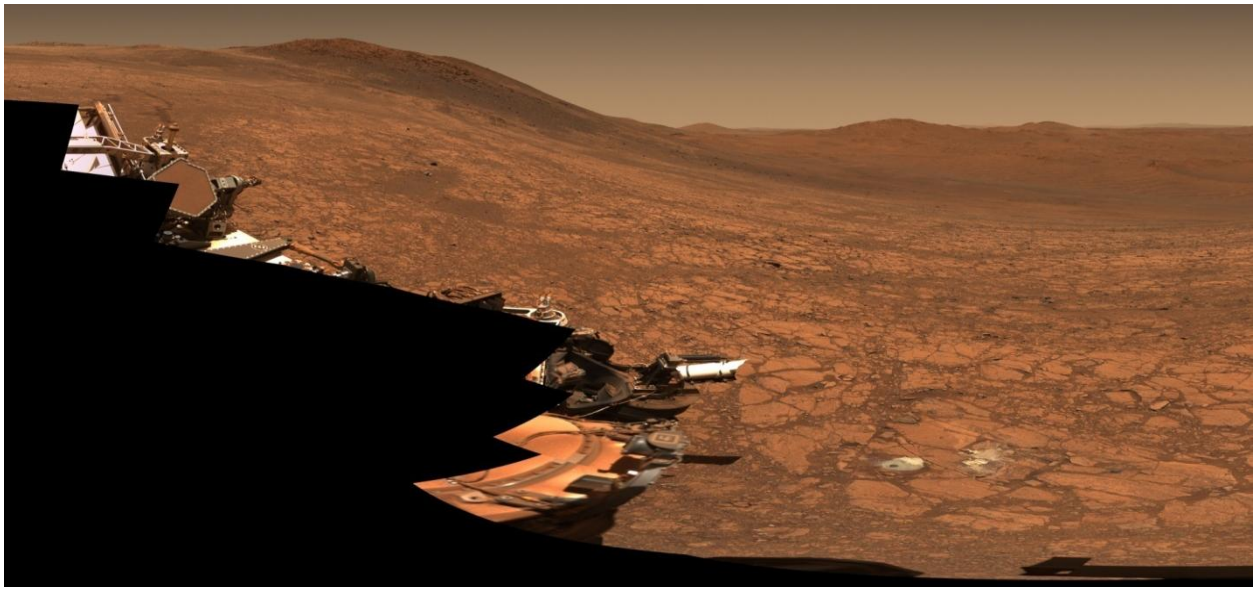


Planche 6 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Broom Point entre les Sols 1438 et 1443 du 8 au 12 mars 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

produite lors la fermeture du tube no 184 contenant l'échantillon « Mageik » récoltée sur la roche « Amalik » au Sol 579 de la mission, et qui fut définitivement fermée 40 jours plus tard après plusieurs tentatives (Sol 619). Il a fallut 13 Sols pour compléter le scellage et la fermeture définitive du tube contenant l'échantillon « Green Garden ». Le haut du tube no 041 a été brossé 33 fois, et huit tentatives d'étanchéité ont été effectuées durant cette période. Sur le Sol 1424, l'astromobile utilise la surface plane du capteur de contact du système d'échantillonnage, conçu pour indiquer le contact de la carotteuse avec une roche avant de prélever une carotte, dans l'objectif d'enfoncé et de compacter l'amas de résidus du forage frais de « Green Garden ». Le but est de préparer le matériau pour obtenir des mesures avec SHERLOC, qui nécessite une surface lisse et stable pour faire des balayages spectraux. L'instrument SHERLOC spécialisé dans la détection de composés organiques, est essentiel à la recherche de signes de vie microbienne passée. Mais trouver ces composés organiques n'est pas chose aisée. La surface supérieure de la plupart des roches découvertes par Perseverance sur Mars a été exposée aux rayons ultraviolets du soleil et au potentiel oxydatif à long terme de l'atmosphère, deux facteurs susceptibles de décomposer les composés organiques. C'est pourquoi obtenir des mesures SHERLOC à partir d'une paroi rocheuse fraîche est idéal.

Figure 11 : Sol 1429 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

Le robot reprend la route vers le nord-ouest au Sol 1429 (Figure 11) sur une pente descendante donnant vers les régions extérieur du cratère, et parcours une distance de 336,28

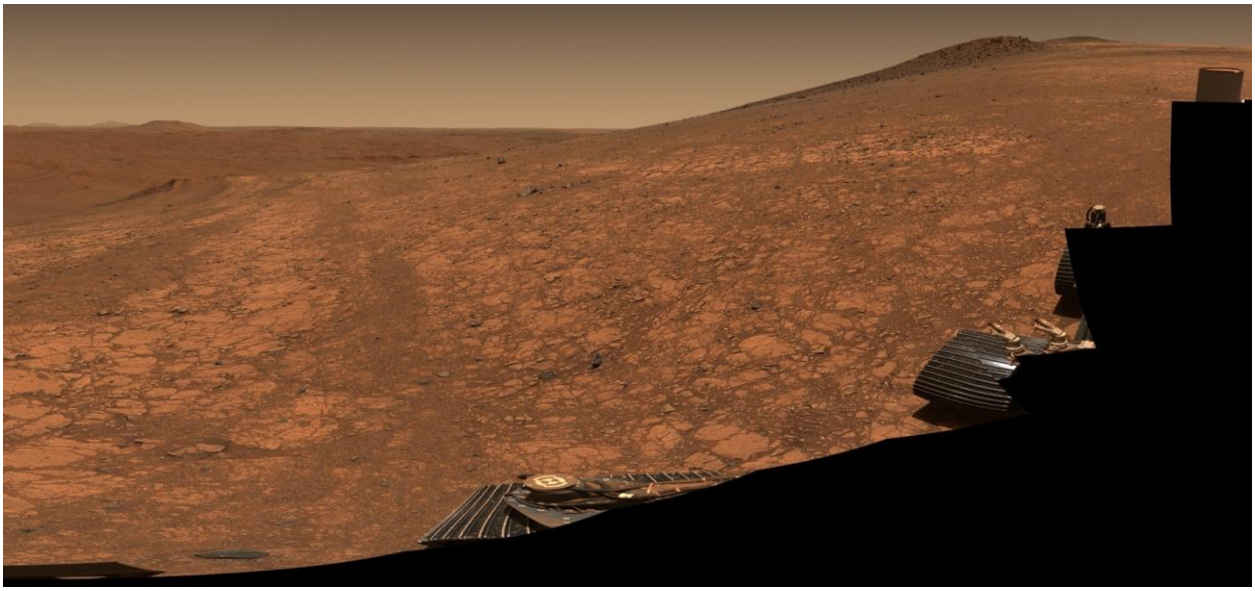


Planche 6 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Broom Point entre les Sols 1438 et 1443 du 8 au 12 mars 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

mètres en deux séance de conduite quotidienne jusqu'au Sol 1431. Sur le Sol 1433 le 2 mars 2025, la combinaison de balayages et de brossages a suffisamment nettoyé l'ouverture supérieure du tube no 041 pour que le bras robotisé de manipulation de l'échantillon logé dans le ventre du rover, fini par presser correctement le tube contre une paroi pour y incérer le bouchon d'étanchéité pour le sceller et de pouvoir stocker l'échantillon de roche chargé de serpentine (Figure 10:B). Les données des instruments du rover indiquent que « Tablelands » est presque entièrement constitué de minéraux serpentiniques[64], un silicate de Fe et de Mg hydraté de la famille des minéraux argileux souvent de couleur verte, qui se forment lorsque de grandes quantités d'eau réagissent avec des minéraux ferrugineux et magnésiens présents dans les roches ignées. Au cours de ce processus, appelé serpentinisation, la structure et la minéralogie originelles de la roche se modifient, provoquant souvent son expansion et sa fracture. Parmi les sous-produits de ce processus, on trouve parfois de l'hydrogène gazeux qui peut entraîner la production de méthane en présence de dioxyde de carbone. Sur Terre, ces roches peuvent abriter des communautés microbiennes dites extrêmophiles et chimiotrophes qui utilise cette sources d'énergie.

Le robot reprend la route vers le nord-ouest au Sol 1435 en parcourant une distance de 44,14 mètres, et s'arrête pour une durée de six jours devant un nouveau site de travail jusqu'au Sol 1445. L'astromobile parcourt un terrain qui présente une alternance de bandes claires et sombres de roche fracturée, qui ne ressemblait à rien de ce que l'équipe scientifique avait observé auparavant. Le rover se prépare à récolter son troisième échantillon du bord du cratère sur un affleurement se trouvant dans l'espace de travail dénommé « Broom Point » ("Point de Départ") (Sols 1435-1451). Les roches du site sur le rebord ouest du cratère « Jezero » contiennent des carbonates, des silicates et une faible teneur en silice (<40%) et une forte teneur en sulfates. Une séance d'abrasion est effectuée sur une roche de l'un des lits clairs au Sol 1436 (« Slants River »),

[64] NASA's Perseverance Mars Rover Studies Trove of Rocks on Crater Rim, April 10, 2025

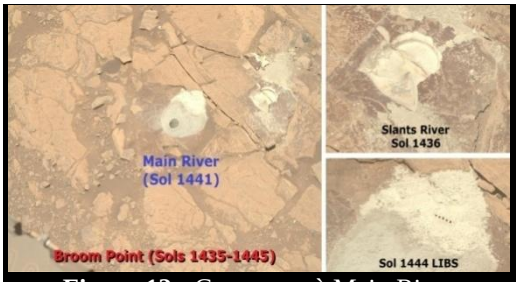


Figure 12 : Campagne à Main River

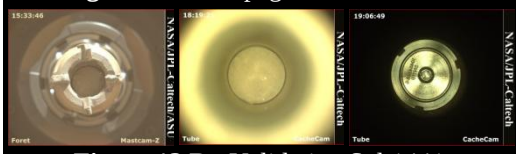


Figure 12 B : Validation Sol 1441
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

mais celle-ci c'est fracturée de manière inattendue sous l'action de la perceuse, créant une surface irrégulière. Les instruments de science de proximités SHERLOC et PIXL ne nécessitent que quelques millimètres de dégagement pour s'approcher de la roche en toute sécurité, et si PIXL a pu atteindre la surface brisée, la topographie semblait un peu plus risquée pour SHERLOC. L'instrument a finalement été déplacé en toute sécurité jusqu'à l'endroit où PIXL avait scanné la roche, et d'obtenir ainsi une carte de mesure spectroscopique juxtaposable. Entre temps, la Mastcam-Z de gauche entame un nouveau panorama couleur de 360° des lieux entre les Sols 1438 et 1443 (Planche 6). Nous pouvons voir à partir de l'image de gauche de la Planche 6, le sommet de la colline « Witch Hazel Hill » suivit du plateau « Krokodillen », et juste en bas nous avons le lieu ou à été effectuée la campagne d'échantillonnage à « Main River ». Vers le centre de la partie gauche de l'image de droite, nous retrouvons l'escarpement rocheux sombre « Sally's Cove », suivit à droite de l'image du sommet « Lookout Hill ». Et après avoir examiné les environs et le patch d'abrasion, Perseverance amorce la 28^{iem} campagne d'échantillonnage par une séance de carottage effectué sur la cible « Main River » (Sols 1441-1445) le 10 mars 2025 au Sol 1441 (Figure 12). Et après les vérifications d'usage, le tube no 010 est scellé hermétiquement en début de soirée à 19h30 LMST (Figure 12:B).

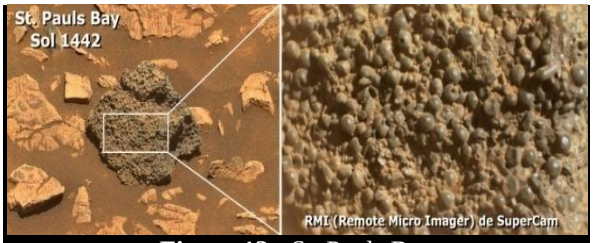


Figure 13 : St. Pauls Bay
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU & Paul Hammond)

Figure 14 : Puncheon Rock
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Un remarquable amas composé de centaines de petites sphérules gris foncé en forme de bulles de la taille d'un millimètre, ressemblant à des myrtilles (ou blueberry) observé pour la première fois par le rover Opportunity à « Meridiani Planum » lors de sa mission sur Mars, a été repéré par la Mastcam-Z au Sol 1442 le 11 mars 2025 dans un rocher nommé « St. Pauls Bay » (Figure 13, et vers le centre de la partie inférieure de l'image de droite de la Planche 6, juste au-dessus de la roue du rover). Certaines sphérules présentent des formes elliptiques allongées, tandis que d'autres présentent des bords anguleux, représentant peut-être des fragments de sphérules brisées, et d'autres semblent percées d'un minuscule trou d'épingle. Le sol du terrain se trouvant dans cette zone est joncé de ce type de conglomérat et de petites sphérules de pierre, comme faisant partie de la composition du sol. Les sphérules ont été interprétées comme des concrétions, formées par interaction avec les eaux souterraines circulant dans les pores de la roche. Cependant, toutes les sphérules ne se forment pas de cette façon. Elles se forment également par refroidissement rapide de gouttelettes de roche en fusion formées lors d'une éruption volcanique, ou par condensation de roche vaporisée par l'impact d'une météorite. Et avant de quitter les lieux au Sol 1445, une expérience LIBS est menée sur les résidus de forage au Sol 1444.

Figure 15 : Sol 1454, Sally's Cove (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

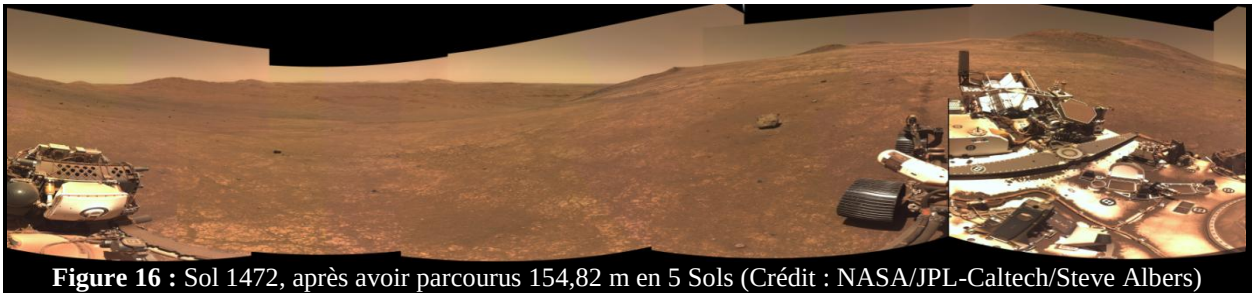


Figure 16 : Sol 1472, après avoir parcourus 154,82 m en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

Figure 17 : Sally's Cove

Figure 18 : Strong Island (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Le robot poursuit l'exploration de « Witch Hazel Hill » datant du Noachien inférieur ou pré-noachien, et effectue un court déplacement de 6,45 mètres vers le nord-ouest au Sol 1445, afin de rejoindre un nouvel affleurement rocheux intéressant dénommé « Puncheon Rock » (Sols 1445-1451). L'affleurement se trouve dans la zone plus sombre composée de gros grains de « Broom Point ». Perseverance entame une séance d'abrasion sur l'affleurement au Sol 1447, puis étudie la cible jusqu'au Sol 1451 (Figure 14). L'astromobile exécute un nouveau déplacement vers le nord-ouest en direction de « Dennis Pond » en parcourant une distance de 59,13 mètres en trois séances de conduite, dans l'objectif de s'approcher d'un promontoire rocheux sombres et de rejoindre « Sally's Cove » (Sols 1454-1468) au Sol 1454 le 23 mars 2025. Le rover est désormais stationné sur le bord extérieur de la crête ouest du cratère « Jezero », avec une vue plongeante donnant directement sur les régions extérieur du cratère (Figure 15). Perseverance exécute deux séances d'abrasions sur le rocher sur la cible « Great Mountain » (Sols 1456 et 1458), mais la roche trop dure est restée intacte (Figure 17). Le rover reprend la route vers le sud en dessinant de nouveau un parcours en forme de boucle dans le sens antihoraire entre les Sols 1468 et 1478, en franchissant une distance de 249,92 mètres effectuée en 5 séances de roulement quotidien. Durant le trajet, l'astromobile à fait une pause dans la région de « Port Anson » (« Salmon Point ») entre les Sols 1472 et 1477 (Figure 16), le temps d'exécutée une séance d'abrasion sur la cible « Strong Island » au Sol 1473 suivis d'une étude de terrain jusqu'au Sol 1477 (Figure 18). Les instruments du rover ont révélé que « Strong Island » contenait une forte signature argileuse.

Le rover poursuit sa route vers le nord-est pour rejoindre une nouvelle fois la zone sombre de la formation Broom Point en parcourant 92,55 mètres au Sol 1477, suivit de 9,15 mètres le lendemain sur le Sol 1478, pour se rapprocher de la nouvelle cible d'échantillonnage qui se

Figure 19 : Campagne à Bell Island

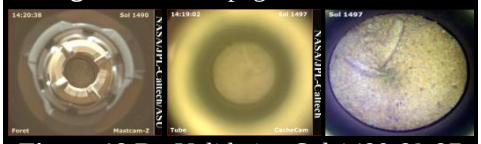


Figure 19 B : Validation Sol 1490-92-97 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

trouve dans l'espace de travail des affleurements « Pine Pond » (Sols 1479-1502) situé près de l'affleurements « Dennis Point ». Le rebot se déplace dans une zone de terrain composé d'une alternance de couches claires et sombres, et pour comprendre la composition et les relations entre ces couches, l'astromobile qui a déjà effectuée l'étude de l'une des couches claire à grains fin à « Main River », est maintenant à la recherche d'une cible de carottage faisant partie d'une couche sombre composée de grain plus grossier que les couches claires, et pouvant contenir des sphérules. L'étude des caractéristiques des ces deux types de terrain pourrait contribuer à résoudre le mystère du processus de formation de ces roches stratifiées et des sphérules. La 29^{iem} campagne de carottage débute avec le nettoyage et l'abrasion de la cible « Hare Bay » au Sol 1479 le 18 avril 2025 avec l'espoir de trouver des sphérules à l'intérieur de la roche (Figure 19). Les images de la zone d'abrasion prises par WATSON montrent que « Hare Bay » contient des grains clairs de taille moyenne, avec des sphérules millimétriques disséminées dans la roche. Les principales hypothèses concernant l'origine de ces sphérules incluent une formation due à l'activité volcanique ou à des processus liés à des impacts.

Le rover Perseverance a mis au jour des preuves qu'un empilement de roches anciennes de 75 mètres d'épaisseur, contenant une grande quantité de minuscules billes sombres et vitreuses, y compris sous la forme d'une couche à matrice d'environ 20 cm d'épaisseur au sein des couches situées sur le rebord externe du cratère « Jezero » à « Broom Point », auraient été formé par des impacts d'astéroïdes répétés. Appelé membre de Broom Point de la formation de Witch Hazel Hill par l'équipe scientifique du rover (Figure 20), le socle noachien soulevé et mis à nu par l'impact de « Jezero » principalement mis en place sous forme d'impactites avant le début de la principale période de conditions aqueuses à la fin du Noachien. Cet ensemble de couches rocheuses est probablement âgé de plus de 3,9 milliards d'années, suggérant qu'elles sont antérieures à la formation du cratère « Jezero », ce qui en fait l'un des terrains les plus anciens jamais explorés par un rover martien jusqu'à maintenant[65] (semblabe à la formation de Matijevic rencontrée à « Cape York » par le rover Opportunity lors de son exploration du cratère « Endeavour » dans « Meridiani Planum »). Les données recueillies à « Broom Point » ont révélé la présence de six types de roches distincts, notamment des brèches (roches composées de fragments anguleux) alternant avec des couches de poussière de roche fine et pulvérisée. Les fragments de roche contenus

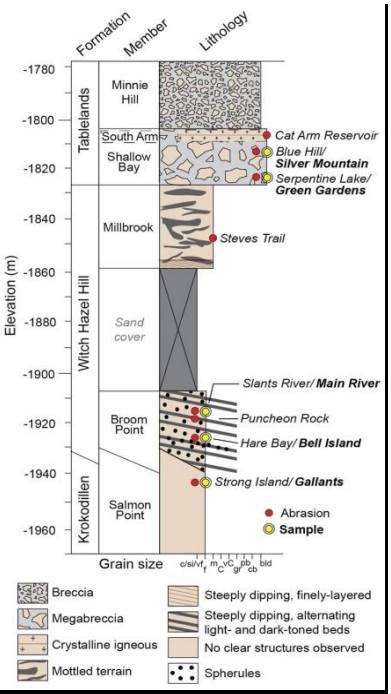


Figure 20 : Colonne géologique montrant la variabilité de l'altitude sur les pentes extérieures du cratère Jezero (Sols 1354-1576) (Voir la note de bas de page 61)

[65] Stratigraphy Preserved on the Jezero Crater Rim Reveals Repeated Impacts on Early Mars July 15, 2026

Figure 20 B **:** Autoportrait capturé par la caméra Watson au Sol 1500 près de Bell Island (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Simeon Schmauß)

dans les brèches sont criblés de cavités remplies de bulles de gaz, témoignant de leur état de fusion passé. Les archives rocheuses de Mars datant du début du Noachien offrent une occasion unique d'étudier les processus de surface qui ont dominé les premiers temps de l'histoire de la formation des planètes telluriques, des archives qui ont été effacées sur Terre en raison du recyclage constant de la croûte par la tectonique des plaques. La formation de Witch Hazel Hill (Sols 1431-1470 et Sols 1477-1502) plus âgée est caractérisé par une stratification claire et sombre située sous la formation des Tablelands plus jeune, et recouvre la formation de Krokodillen riche en phyllosilicates. Cette dernière se caractérise à celle des sols basaltiques martiens moyens, avec des signes minimes d'altération aqueuse avec la présence de nombreuses sphérules dans sa partie inférieure. La partie la plus basse de la formation de Witch Hazel Hill est le membre de Broom Point (Sols 1470-1476 et Sols 1549-1552), riche en sphérules et affleurant sur une hauteur d'environ 25 à 35 mètres et la partie la plus haute de la formation est délimitée par le membre Millbrook.

Une séance de carottage est programmée sur le Sol 1483, mais durant le forage le rover a détecté un mouvement inattendu dépassant les limites autorisées, attribuable à un léger enfoncement de la roche au fur et à mesure du forage, et le trépan a resté coincé dans la roche jusqu'au Sol 1485. Il s'avéra que cette roche était particulièrement dure, bien différentes des roches friables du bord intérieur du cratère qui se désagrégèrent sous le choc de la carotteuse. Mais après avoir réussie une séquence de rétraction du trépan de la roche, une nouvelle séance de carottage est effectué au même endroit au Sol 1490 sur la cible « Bell Island » le 29 avril 2025. Il s'agit du quatrième échantillonnage récolté dans la région de la colline « Witch Hazel Hill », dont la compisition s'est révélé être similaire à celle de « Main River » (une roche ignée d'origine volcanique). La carotte de « Bell Island » contenait les sphérules recherchées, mais le tube d'échantillon était trop rempli. Une longueur de carotte excessive empêchait de sceller le tube. Finalement, une opération de vidange à fini par faire évacuer une partie de l'échantillon du tube. Cette opération a permis de prélever suffisamment d'échantillon pour que le tube no 032 puisse être vérifié mais non scellé au Sol 1497. Pour célébrer le 1500^{iem} Sol d'exploration de la planète rouge le 10 mai 2025 (équivalent à 1541 jours terrestres), Perseverance a utilisé son bras robotisé pour prendre un selfie du paysage environnant et du rover (Figure 20:B). Ce nouveau selfie, le cinquième de Perseverance depuis le début de la mission sur Mars en 2021, a été réalisé à partir d'une série de 59 images collectées par la caméra WATSON située à l'extrémité du bras robotique. Il a fallu 62 mouvements précis du bras robotisé avec des positions légèrement

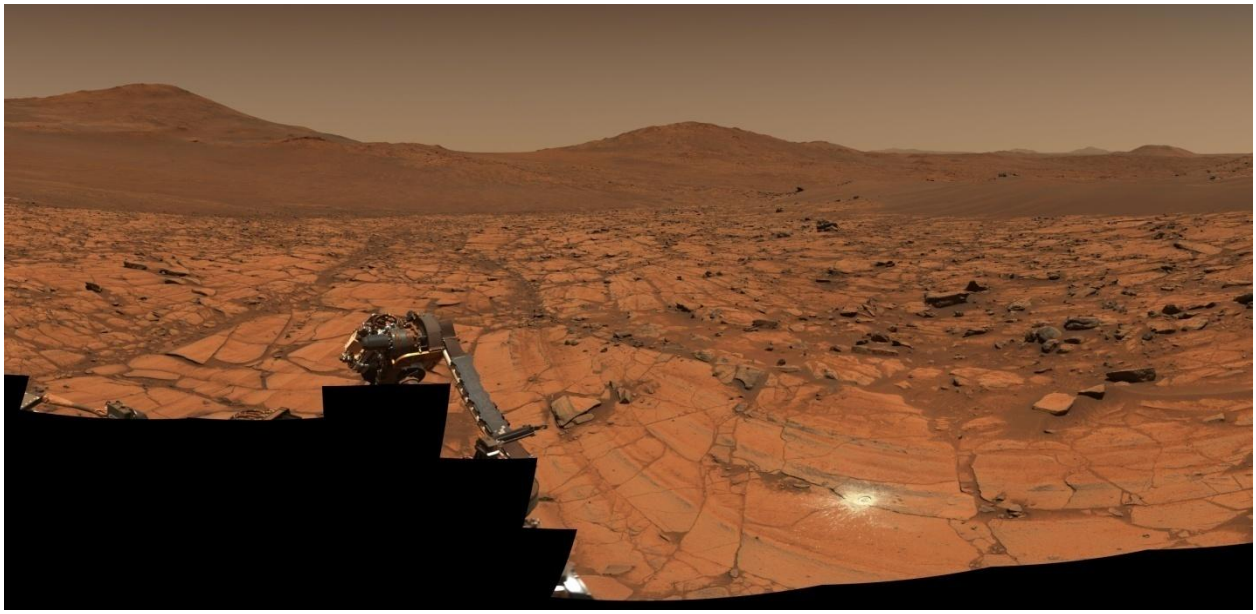


Planche 7 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Falbreen au Sol 1516 le 26 mai 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

différentes durant environ une heure pour construire le selfie. Jusqu'à maintenant, Perseverance a abrasé et analysé un total de 49 roches ou de régolithe avec ses instruments scientifiques, effectuées 29 carottages (dont 3 qui ont échouées : « Dragon's Egg » et 2 dans les environs de « Cat Arm Reservoir ») et collecté 26 carottes de roche (25 scellées et 1 laissée non scellée « Bell Island »), deux échantillons de régolithe (roche concassée et poussière), trois tubes témoins, un échantillon atmosphérique et parcouru près de 34 kilomètres. Il reste encore onze tubes d'échantillon pouvant être utilisés dans le ventre du rover.

Figure 21 : Copper Cuve (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Le robot quitte la région riche en sphérules de la colline « Witch Hazel Hill » et reprend la route vers l'ouest au Sol 1502. Et après avoir parcourus une distance de 263,25 mètres en deux séances de conduite, Perseverance s'arrête au Sol 1503 pour exécuter une séance d'abrasion de la cible « Coopers Head » se trouvant sur l'affleurement rocheux clair appelé « Copper Cove » (Sols 1504-1507) le lendemain sur le Sol 1504 (Figure 21). Par rapport au sommet de la crête ouest du cratère atteint au Sol 1354, d'une hauteur de plus de 779 mètres par rapport au site d'atterrissage, le robot a effectué une descente de plus de 186 mètres sur les pentes extérieurs de la crête ouest du cratère. Il s'agit d'une nouvelle région d'intérêt géologique baptisée « Krokodillen » (Sols 1503-1597), qui signifie « le crocodile » en norvégien, composée d'un large plateau d'affleurements rocheux relativement bas sur la pente extérieures du bord du cratère situé à l'ouest et au sud de la colline « Witch Hazel Hill », et qui pourrait contenir certaines des plus anciennes roches martiennes (formation de Krokodillen). Cette zone marque une frontière importante entre les roches les plus anciennes du bord du cratère « Jezero » et celles des plaines au-delà. C'est dans ces roches que l'instrument SuperCam a commencé à détecter des signatures de minéraux argileux, également appelés « phyllosilicates ». Les minéraux argileux se forment principalement par des interactions importantes entre les

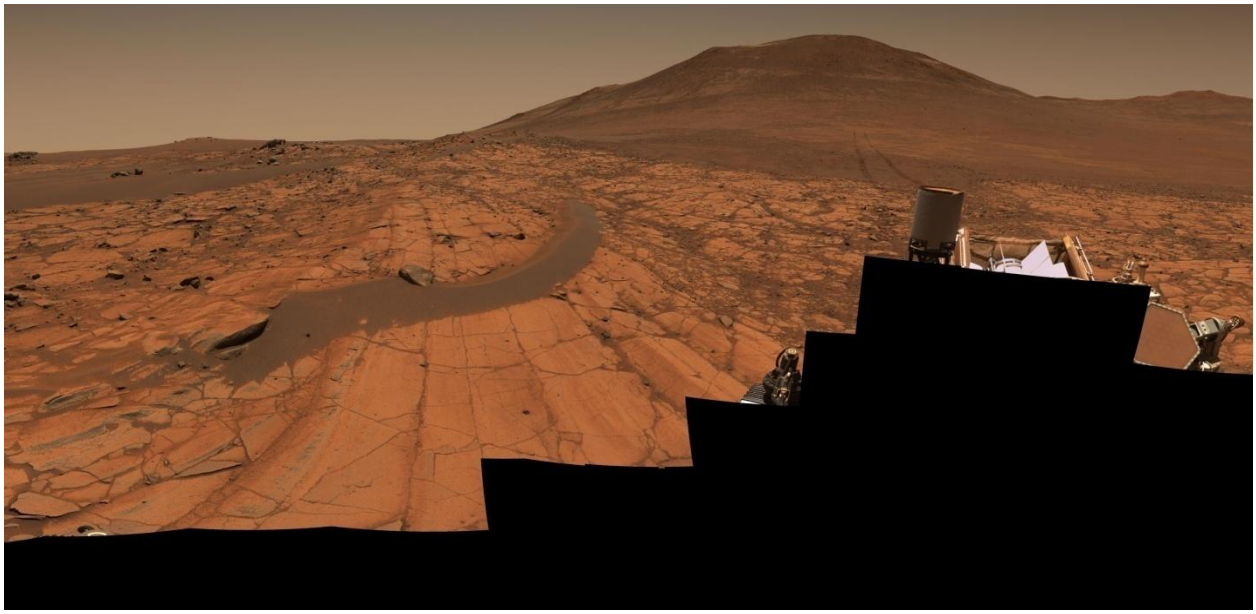


Planche 7 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Falbreen au Sol 1516 le 26 mai 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 22 : Sol 1509 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

roches basaltiques et l'eau liquide. Les phyllosilicatess sont également excellents pour préserver les matières organiques, lorsqu'elles sont présentes, en les adsorbant ou en les encapsulant dans leur structure minérale. L'astromobile reprend la route et poursuivi sa descente progressive vers le sud au Sol 1509 (Figure 22), ou le robot franchit le cap de son 34^{iem} kilomètre parcourus sur la planète Mars. Dans la partie supérieure de droite de la figure 22, nous pouvoir voir le sommet sud de « Lookout Hill » suivit à sa gauche du sommet de « Witch Hazel ». Perseverance entame une nouvelle randonnée d'exploration en empruntant un trajet sous la forme d'une boucle antihoraire entre les Sols 1511 et 1539, avant de remonte vers le nord au Sol 1540.

Durant se long trajet vers le sud, le rebot atteint un affleurement rocheux de teinte clair riche en argile (phyllosilicates) au Sol 1512, situé dans la zone « Fallbreen » (Sols 1512-1517) à la limite de la bordure ouest du plateau « Krokodillen ». Le lendemain le rover entame une séance d'abrasion sur la cible « Marmen » (Figure 23, et vers le centre de la partie inférieur de l'image de gauche de la Planche 7), et étudie la cible et ses environs jusqu'au Sol 1516. Le rebot reprend la route vers l'est au Sol 1518, et le lendemain sur le Sol 1519 l'astromobile assiste à l'arrivé de son troisième solstice d'été dans l'hémisphère nord de la planète le 29 mai 2025 (45 mètres de dénivelé entre les Sols 1510-1520). Et après avoir bouclée la boucle dans l'exploration de la partie centrale du plateau « Krokodillen » au Sol 1524. Perseverance se positionne devant la cible de roche riche en argile (phyllosilicates) baptisée « Laknes » (Sols 1525-1529) situé sur

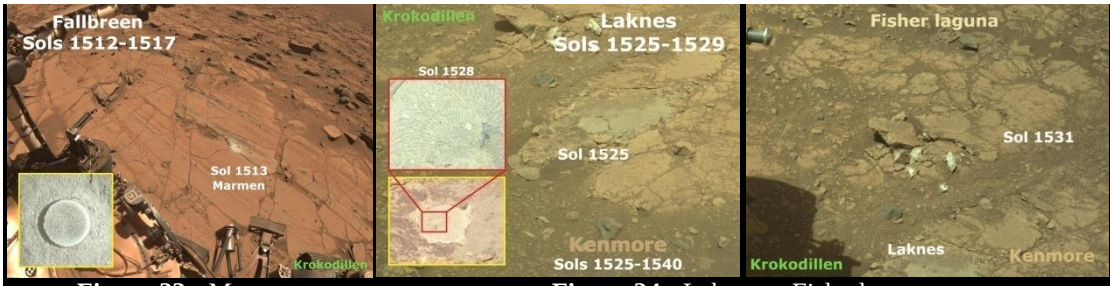


Figure 23 : Marmen **Figure 24 :** Laknes et Fisherlaguna
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU et Paul Hammond pour l'image de gauche)

l'affleurement « Kenmore », et amorce une séance d'abrasion au Sol 1525 le 5 juin 2025 (Figure 24). Le polissage des zones d'abrasion permet d'obtenir une surface vierge et plane, permettant aux instruments scientifiques de Perseverance d'étudier la roche de très près, et de faire des analyses plus approfondie sur la composition intérieur resté intact pendant des milliards d'années, préservé de toute altération par le vent, les radiations ou de la poussière, et pouvant fournir des indices sur l'histoire de la roche. Une deuxième tentative d'échantillonnage incluant une campagne de carottage est effectué un peut plus haut, mais sans effectué une séance d'abrasion mécanique par la foreuse, mais qui a fait l'objet d'un protocole de dépoussiérage et de marquage laser de précision effectuée sur la cible « Fisherlaguna » au Sol 1531 (Figure 24:B). Cependant, aucun noyau n'a été récupéré, probablement en raison de la fragmentation de la roche lors du carottage. Après l'étude du terrain et de plusieurs cibles se trouvant aux alentours du site de travail de « Kenmore ». Le rebot reprend la route vers le nord en direction de la zone « Main Topsail » et de « Salmon Point » au Sol 1540 en parcourant une distance de 405,49 mètres en 265,8 minutes (4h25m et 47 sec), soit la troisième distance la plus longue parcourus sur un même Sol depuis le début de la mission du rover sur Mars. Durant le dernier trajet (Sol 1540), l'astromobile à franchit le cap du 35^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars (35 370,59 mètres), et dépasse ainsi de 219,3 mètres la distance parcourus par le rover Curiosity dans le cratère « Gale » (35 151,29 mètres) correspondant au Sol 4575 de sa mission le 20 juin 2025.

Après un court déplacement de 9,96 mètres effectué au Sol 1542, pour rejoindre un nouvel emplacement d'étude dénommé « Main Topsail ». Le robot tente d'abraser et d'échantillonner des cibles de roches argileuses, la première « Glide Brook » au Sol 1545 et la seconde baptisée « Jigging Cove » au Sol 1547 (Figure 25) incluant une analyse complète de Mastcam-Z et de SuperCam (LIBS, VISIR et RMI), mais ces roches se révèlent très fragiles et difficiles à échantillonner et à abraser. Le rover tourne vers l'est au Sol 1549 en roulant sur une distance de 96,17 mètres vers un emplacement dénommé « Salmon Point » (Sols 1472-1477), qui marque le contact inférieur du membre de Broom Point avec la formation de Krokodillen. Le

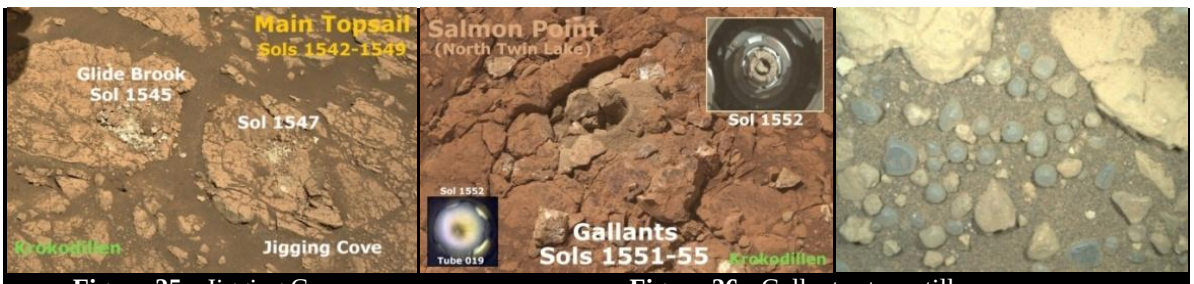


Figure 25 : Jigging Cove **Figure 26 :** Gallants et myrtilles
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/Paul Hammond et Kevin M. Gill pour l'image de droite)

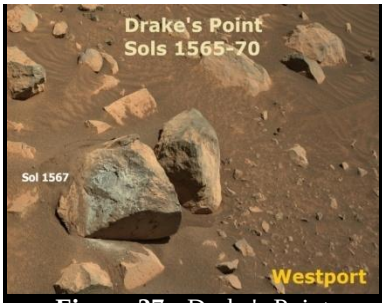


Figure 27 : Drake's Point

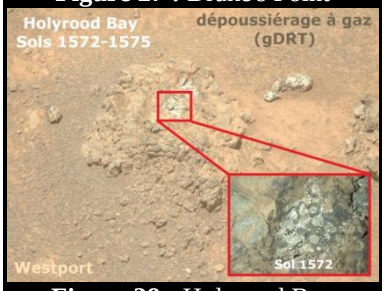


Figure 28 : Holyrood Bay (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

robot revient près de l'emplacement ou se trouvait la zone d'abrasion de « Strong Island » examiné plus tôt au cours de la mission entre les Sols 1472 et 1477 (Figure 18), où l'unité argileuse du plateau « Krokodillen » rencontre une formation rocheuse à olivine. Le rover se positionne devant l'affleurement « Gallants » (qui sera associé à la zone d'abrasion « Salmon Point »), qui se trouve dans l'espace de travail « Salmon Point ». Mais après une tentative de carottage sur la cible de roche au Sol 1552 (Figure 26:A), un résidu de roche est restée coincée dans le trépan. Après vérification le tube no 019 est validé mais non scellé au Sol 1552, l'échantillon sera soit scellé ou soit déversé sur le sol pour être remplacé par un échantillon différent. « Gallants » est le cinquième échantillon collecté sur le rebord du cratère « Jezero » et le premier provenant du plateau « Krokodillen ». L'échantillon a été collecté à environ 85 mètres au sud-ouest et à environ 20 mètres plus bas que l'échantillon de « Main River ». Sur le site de travail de « Rowsell Hill », Perseverance observe à nouveau des myrtilles (ou blueberry) sur le Sol 1555 le 5 juillet 2025 (Figure 26:B). Malgré leur ressemblance avec les « myrtilles » observées par le rover Opportunity, les sphérules de « Rowsell Hill » présentent une composition et une origine probable très différentes. À « Meridiani Planum », les sphérules étaient composées d'hématite et se seraient formées dans des sédiments saturés d'eau souterraine, mer peut profonde ou à travers un environnement de type évaporite dans un passé lointain de la planète Mars. En revanche, les sphérules de « Rowsell Hill » ont une composition basaltique et se sont probablement formées lors de l'impact d'un météoroïde ou d'une éruption volcanique. Lorsqu'un météoroïde s'écrase à la surface de Mars, il peut faire fondre la roche et projeter des gouttelettes en fusion dans l'air. Ces gouttelettes peuvent ensuite se refroidir rapidement et se solidifier en sphérules qui retombent sur la zone environnante. Il est également possible que ces sphérules se soient formées à partir de lave en fusion lors d'une éruption volcanique.

Le robot change de direction pour se déplace à nouveau vers l'ouest au Sol 1556, en parcourant une distance de 209,14 mètres en trois séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 1563. En court de route, le rebot étudie différentes cibles qui se trouve sur le sol en longeant l'extrémité nord-ouest du plateau « Krokodillen ». L'astromobile se déplace vers un site dénommé « Westport » situé près du rebord extérieur le plus à l'ouest du cratère, où l'unité argileuse « Krokodillen » rencontre une formation rocheuse riche en olivine (« Vernodden »). Il est possible que ces roches riches en olivine constituent une unité ignée intrusive, c'est-à-dire qu'elles se seraient formées lorsque du magma en fusion provenant des profondeurs de Mars a été

Figure 29 : Sol 1584 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

Planche 8 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Vernodden au Sol 1603 le 24 août 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Planche 9 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Taylorfjellet (Sols 1618-1621) du 8 au 11 septembre 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

poussé vers la surface et s'est refroidi sous celle-ci. La chaleur du magma intrusif peut modifier profondément la géologie environnante par un phénomène appelé « métamorphisme de contact ». La chaleur « cuit » les roches voisines, créant de nouveaux minéraux potentiellement propices à la vie microbienne[66]. Après avoir nettoyé la surface d'un rocher riche olivine appelé « Drake's Point » (Sols 1565-1570), grâce à son outil de dépoussiérage à gaz (gDRT) au Sol 1565. Une séance d'abrasion est exécutée sur la cible de roche au Sol 1567 le 17 juillet 2025 (Figure 27), mais le déplacement de la roche a fait avorter la séance. Le robot se déplace quelque peut vers le sud-est pour se placer devant un petit fragment rocheux rugueux appelé « Holyrood Bay »

[66] Feeling the Heat: Perseverance Looks for Evidence of Contact Metamorphism, Melissa Rice, Mars 2020 Mission Team Members, Jul 22, 2025

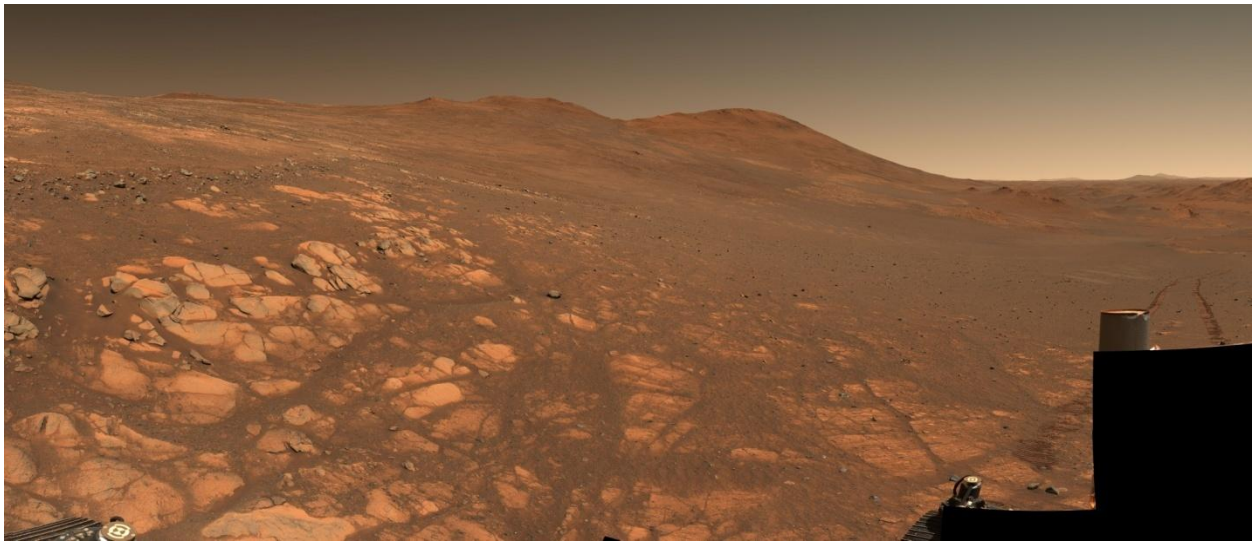


Planche 8 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Vernodden au Sol 1603 le 24 août 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

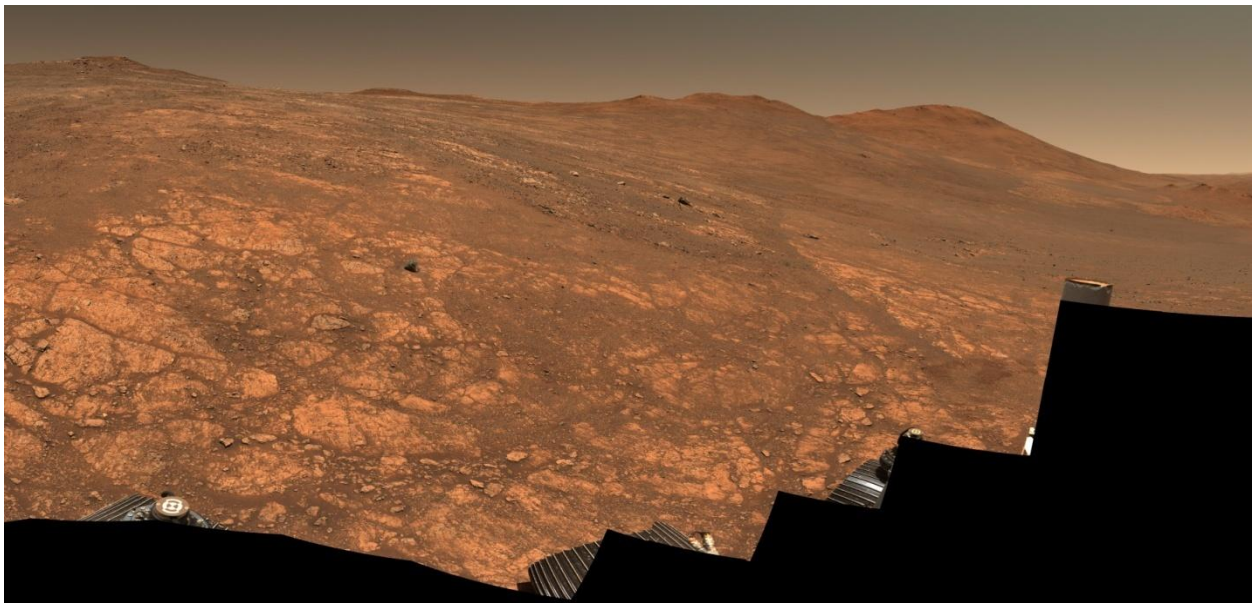


Planche 9 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Taylorfjellet (Sols 1618-1621) du 8 au 11 septembre 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

(Sols 1572-1575), afin de faire une nouvelle séance de dépoussiérage à jet de gaz (gDRT) au Sol 1572 (Figure 28). Dans de rares cas, l'équipe de la mission utilise le gDRT seul sur des roches jugées trop friables ou trop petites pour être abrasées mécaniquement (comme la cible nommée « Holyrood Bay »). Cela permet de nettoyer superficiellement la roche naturelle sans altérer sa structure.

Figure 30 : Horneflya Sol 1585 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

L’astromobile se déplace ensuite vers le sud en parcourant une distance de 554,54 mètres en trois Sols de

Planche 10 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Plankeholmane au Sol 1660 le 21 octobre 2025 offrant une vue plongeante sur Nili Fossae (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

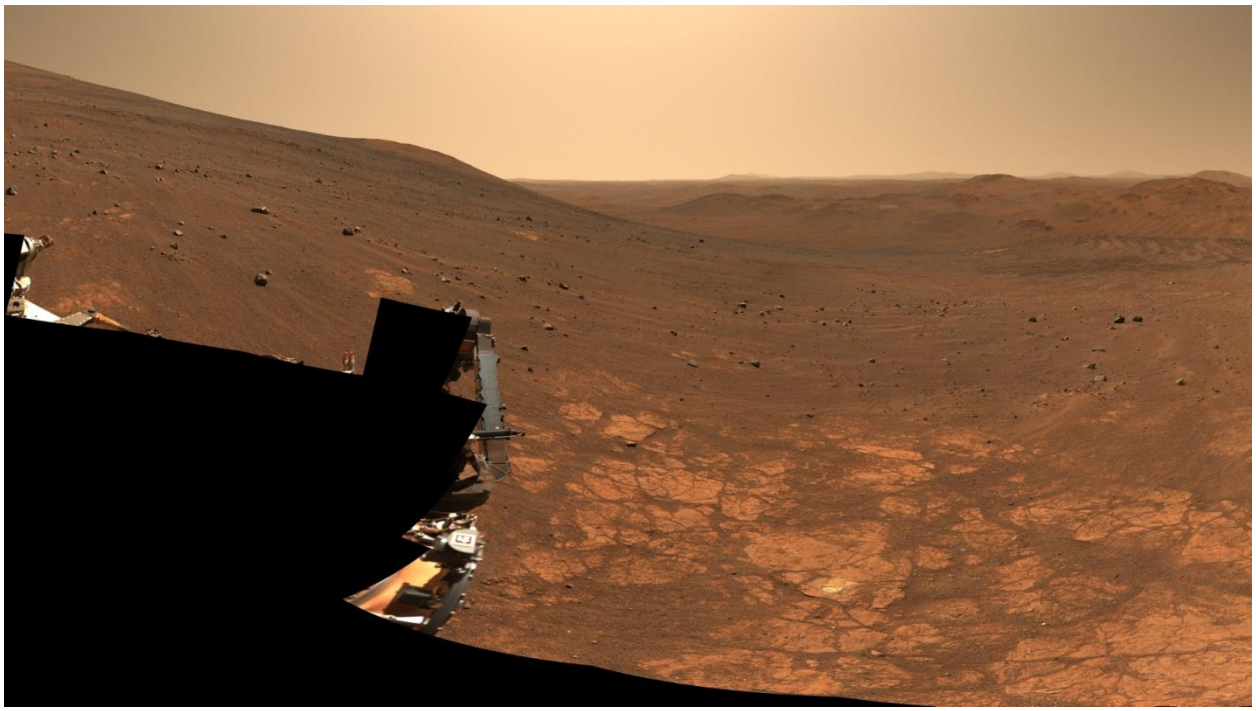


Planche 11 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Tatarka au Sol 1695 le 26 novembre 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

roulement (Sols 1576-1579) vers l'extrémité Est du plateau « Krokodillen ». Durant le dernier trajet sur le Sol 1577, le rover Perseverance franchit le cap de son 36^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars le 28 juillet 2025. Sur le Sol 1585 le 5 août 2025 (Figure 29), le rover

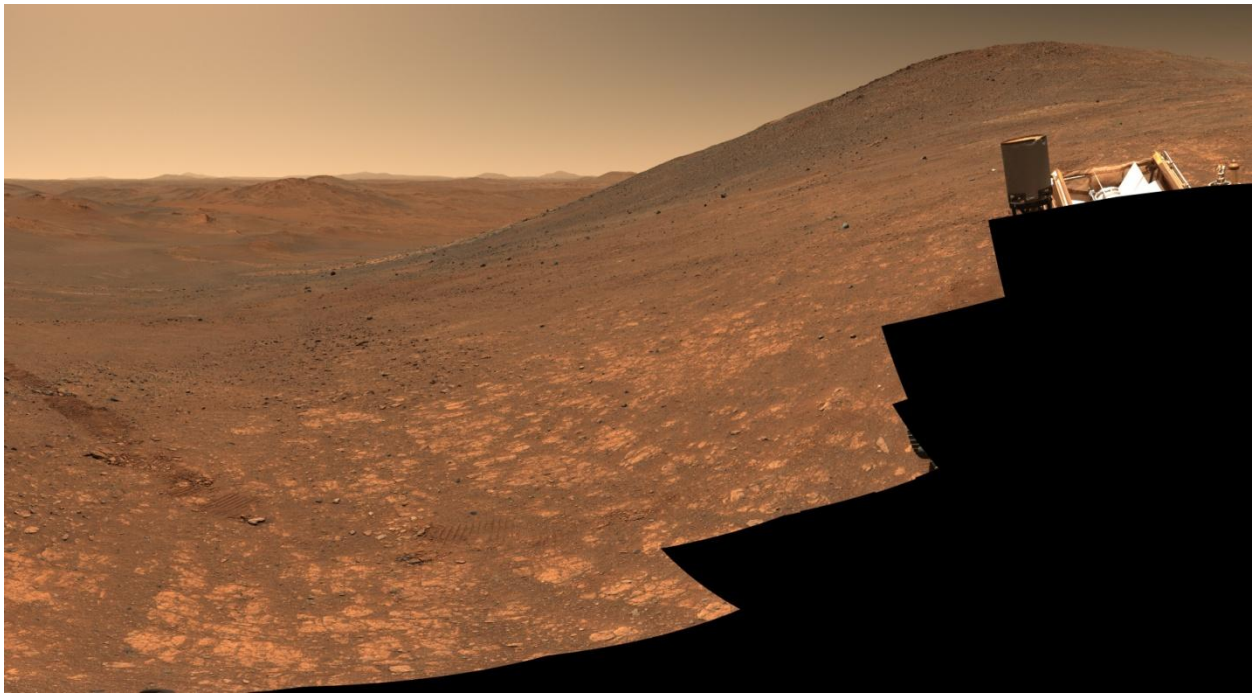


Planche 10 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Plankeholmane au Sol 1660 le 21 octobre 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

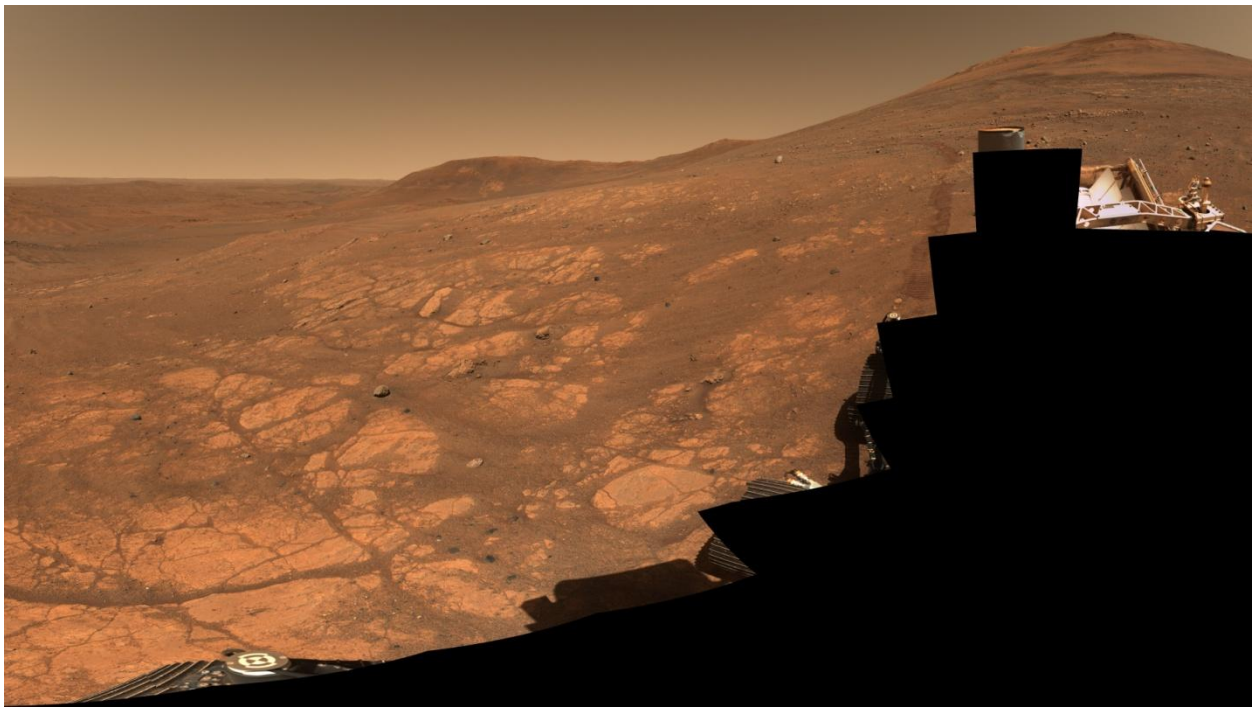


Planche 11 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site site Tatarka au Sol 1695 le 26 novembre 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

rencontre pour une deuxième fois une roche en forme de chapeau de sorcière ou de casque baptisée « Horneflya » (Figure 30). Une roche composée d'un amas de centaines de petites sphérules gris foncé ressemblant étrangement à « St. Pauls Bay » rencontré sur le Sol 1442

Figure 31 : Sol 1593 Parnasset (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

Figure 32 : Nordoya

Figure 33 : Peachflya

Figure 34 : Klorne

Figure 35 : Stigbreen

(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

(Figure 13). Le robot repart vers le sud-ouest au Sol 1592 (Figure 31), et s'arrête près d'un champ de dune pouvant atteindre un mètre de hauteur sur le site de travail dénommé « Parnasset », le temps d'étudier la dune « Kerrlaguna » (Sols 1593-1595) et ses environs. Le robot reprend ensuite la route et quitte définitivement la zone du plateau « Krokodillen » au Sol 1597, en se dirigeant vers le sud-est en direction de la crête composée d'affleurement rocheux surélevé clair riche en olivine nommé « Soroya Ridge », et parcours une distance de 611,69 mètres en 3 séances de roulement quotidien entre les Sols 1595 et 1601. Perseverance franchit le cap de son 37^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars sur le Sol 1601 le 21 aout 2025. Le rover Perseverance poursuit son exploration au-delà du rebord du cratère « Jezero » sur un terrain connu sous le nom de mégabrèche (Sols 1606-1674). La zone est composée d'un mélange chaotique de fragments de roche probablement formé lors d'impacts d'astéroïdes anciens, dont certains blocs recelant des indices sur l'histoire géologique primitive de Mars, pourraient provenir des couches plus profonde expulsées lors de l'impact cataclysmique qui a créé le vaste bassin « Isidis » de 1 930 kilomètres de diamètre situé juste à l'est de « Jezero » (Planche 8), l'un des plus grands bassins d'impact sur Mars. L'étude du terrain commence avec l'abrasion de la cible de roche « Nordoya » (Sols 1610-1615) au Sol 1610 le 31 août 2025 (Figure 32). Le robot se déplace ensuite de 4,26 mètres vers le nord pour rejoindre la zone de travail baptisée « Vernodden » située au pied du flanc sud-ouest du sommet de « S. Lookout Hill », et exécute des séances d'abrasion sur deux roches radicalement différentes en l'espace de quelques jours. Il s'agit de la roche « Peachflya » (Sols 1615-1622) au Sol 1618 (Figure 33 et Planche 9) et de la cible de roche « Klorne » (Sols 1623-1627) au Sol 1623 (Figure 34). La surface de « Klorne » est verdâtre parsemée de taches sombres et de veines blanches, témoignant d'une importante altération chimique. La teinte verte de la roche semble corresponde à celle de la serpentine. Entre les Sols 1627 et 1629, l'astromobile fait un petit parcours en forme de demi-cercle vers le sud-est pour rejoindre la nouvelle cible d'étude baptisée « Stigbreen » (Sols 1631-1635), dont une séance d'abrasion est programmée au Sol 1631 le 21 septembre 2025 (Figure 35).

Le rover martien Perseverance a levé la tête vers le ciel nocturne pour faire sa première observation de la comète interstellaire 3I/Atlas (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System) au Sol 1640 le 1er octobre 2025, lors de son passage à proximité de Mars à seulement 0,3 UA (~40

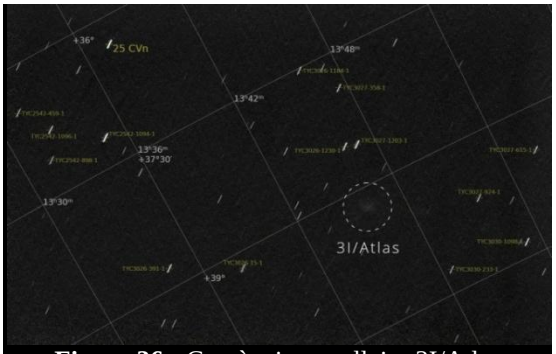


Figure 36 : Comète interstellaire 3I/Atlas (NASA/JPL-Caltech/ASU/Simeon Schmauß)

millions de kilomètres), dont la position se trouvait alors dans la constellation du Bouvier. Seule une très légère tache est visible à côté d'un champ d'étoiles aussi faibles que la magnitude 8 sur les images prises par la caméra de la Mastcam-Z de droite (avec un téléobjectif de 100 mm). La comète d'origine interstellaire a été observée pour la première fois dans la constellation du Sagittaire le 1er juillet 2025 par le télescope spatial ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System), financé par la NASA et situé à Rio Hurtado au Chili. La comète interstellaire 3I/ATLAS effectue son passage le plus rapproché à moins de 30 millions de km de Mars le 3 octobre 2025 au Sol 1642. Les orbiteurs ExoMars TGO et Mars Express de l'ESA, et la sonde Mars Reconnaissance Orbiter et le rover Perseverance de la NASA (Figure 36), ont également observé la comète entre le 1er et le 7 octobre, fournissant des données cruciales sur sa composition et sa trajectoire, indiquant la présence d'un minuscule noyau (moins d'un kilomètre) et une vitesse de 210 000 km/h. Il y a beaucoup plus de CO_2 et un peu plus de méthane par rapport à l'eau que dans les comètes normales de notre système solaire. Il s'agit du troisième objet interstellaire confirmé après 'Oumuamua en 2017 (noyau de 80 mètres) et de 2I/Borisov en 2019 (noyau de 400 mètres). L'image de la Mastcam-Z de droite de la comète (Figure 36), est composée de 20 expositions individuelles prises peut après 21h30 (heure local de Mars), pour un temps d'intégration total de 10 minutes. Elle a ensuite été débruitée avec Adobe Lightroom et annotée avec PixInsight.

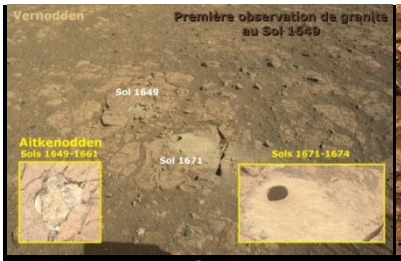


Figure 37 : Sols 1649 et 1674

Figure 38 : Sol 1678

Figure 39 : Sol 1692

(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/Paul Hammond)

L'astromobile se déplace ensuite de 69,9 mètres vers le nord et entame l'étude de la cible « Aitkenodden » entre les Sols 1649 et 1661, incluant une séance d'abrasion exécutée sur le Sol 1649 (Figure 37), première observation de granite (quartz) dans une roche ignées broyé par un impacte et expulser dans les airs avant de retombé sur le sol. Le granite est une roche ignée intrusive (ou plutonique), sa formation est un processus qui se déroule entièrement sous la surface de la Terre dans la croûte terrestre profonde (manteau supérieur), souvent au niveau des zones de collision entre les plaques tectoniques. Coincé sous des kilomètres de roche qui agissent comme un isolant thermique, le magma va mettre des centaines de milliers, voire des millions d'années à se refroidir. Sous l'effet d'une chaleur intense et d'une forte pression, les roches préexistantes fondent pour former un magma riche en silice, en aluminium et en potassium (un magma "felsique"). Ce refroidissement extrêmement progressif laisse tout le temps nécessaire aux atomes pour s'organiser en minéraux imbriqués les uns dans les autres (texture grenue) pour former de gros cristaux visibles à l'œil nu (quartz, feldspath et le mica). Le rebot reprend la route vers le

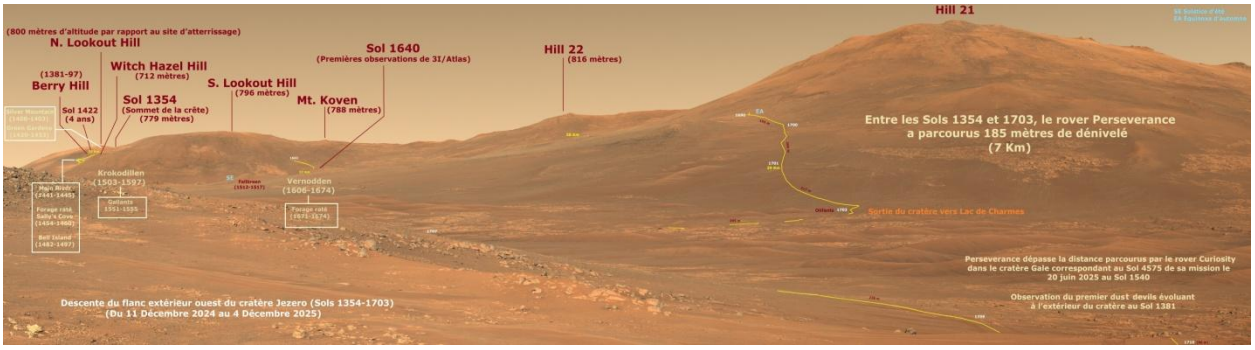


Planche 12 : Descente du cratère Jezero, image extrait du panorama du site Crocodile Bridge prise au Sol 1717 le 19 décembre 2025 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

nord au Sol 1661, puis faisant face à une pente trop abrupte du flanc sud-ouest de « S. Lookout Hill » (situé à environ 200 mètres au nord-ouest de Mount « Koven »), le rover revient sur ses pas au Sol 1663 pour se repositionner de nouveau à proximité de la zone d'abrasion antérieure. Une tentative de carottage est sélection sur le pavé d'affleurement (Sols 1671-1674) situé juste sous le pavé ou a eu lieu l'abrasion antérieure (Figure 37). Une séance de forage est finalement programmée au Sol 1671 le 1er novembre 2025, mais après vérification le tube est resté vide. Après avoir passé plus de 2 mois et 9 jours (Sols 1606-1674) à explorer la zone de « Vernodden » située au pied du flanc sud-ouest de « S. Lookout Hill », Perseverance reprend la route vers le sud-ouest et parcours une distance de 499,35 mètres en 3 séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 1676. Le rover se positionne durant dix jours devant une roche de forme rectangulaire entre les Sols 1678 et 1686, et après nettoyage de la roche l'astromobile exécute une séance d'abrasion sur la cible « Ruggen » au Sol 1678 le 8 novembre 2025 (Figure 38). L'astromobile reprend la route vers le sud-ouest au Sol 1686, ou il franchit la borne du 38iem kilomètre parcourus à la surface de la planète rouge, et parcours une distance de plus de 905,05 mètres en 3 séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 1690. Après examen d'un l'affleurement rocheux (Sols 1692 -1697), une séance d'abrasion est effectué sur la cible « Bubenka » au Sol 1692 le 23 novembre 2025 (Figure 39). Après l'étude de la dernière zone de travail, l'astromobile amorce la descente finale des pentes du versant extérieures de la crête ouest du cratère « Jezero » au Sol 1700, d'une hauteur de plus de 101 mètres par rapport au sommet de la crête exploré au Sol 1354. Le robot reprend la route vers le sud-ouest en direction de « Nili Fossae » en parcourant une distance de plus de 905,05 mètres sur une pente descendante de plus de 84 mètres suplémentaire effectuée en 3 séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 1703 le 4 décembre 2025, ou l'astromobile franchit le cap de son 39iem kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Durant le dernier trajet, l'équinoxe d'automne a fait son entrée dans l'hémisphère Nord de la planète au Sol 1698 le 29 novembre 2025.

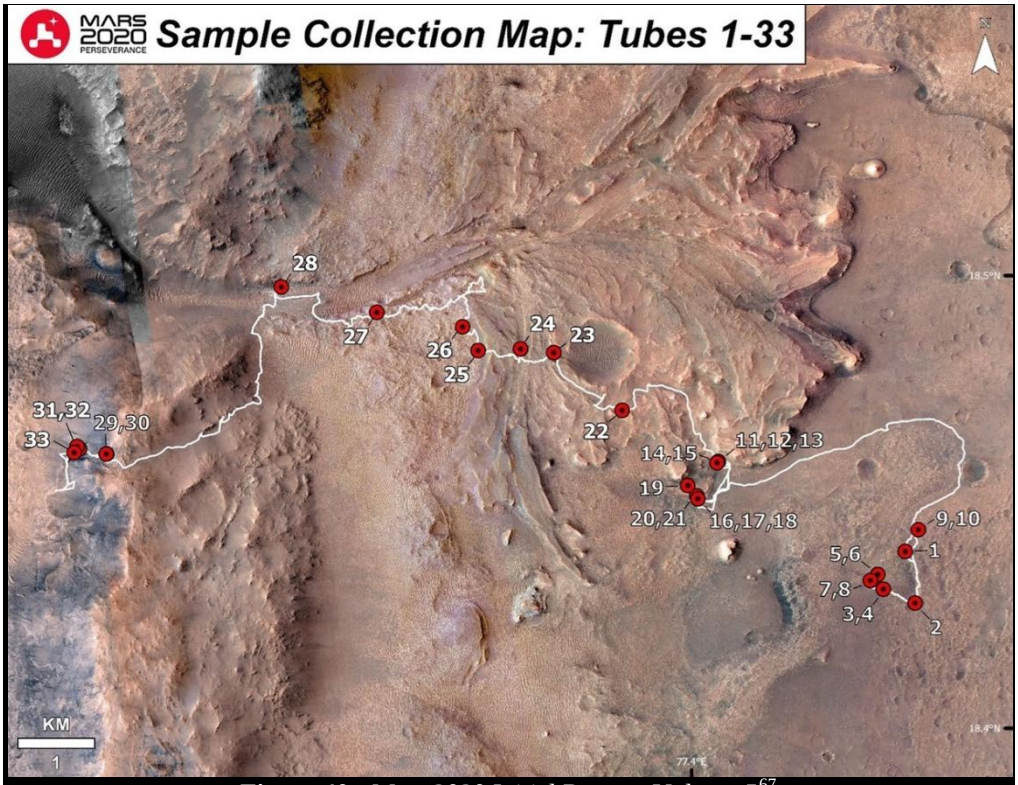


Figure 40 : Mars 2020 Initial Reports Volume 5[67]
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS)

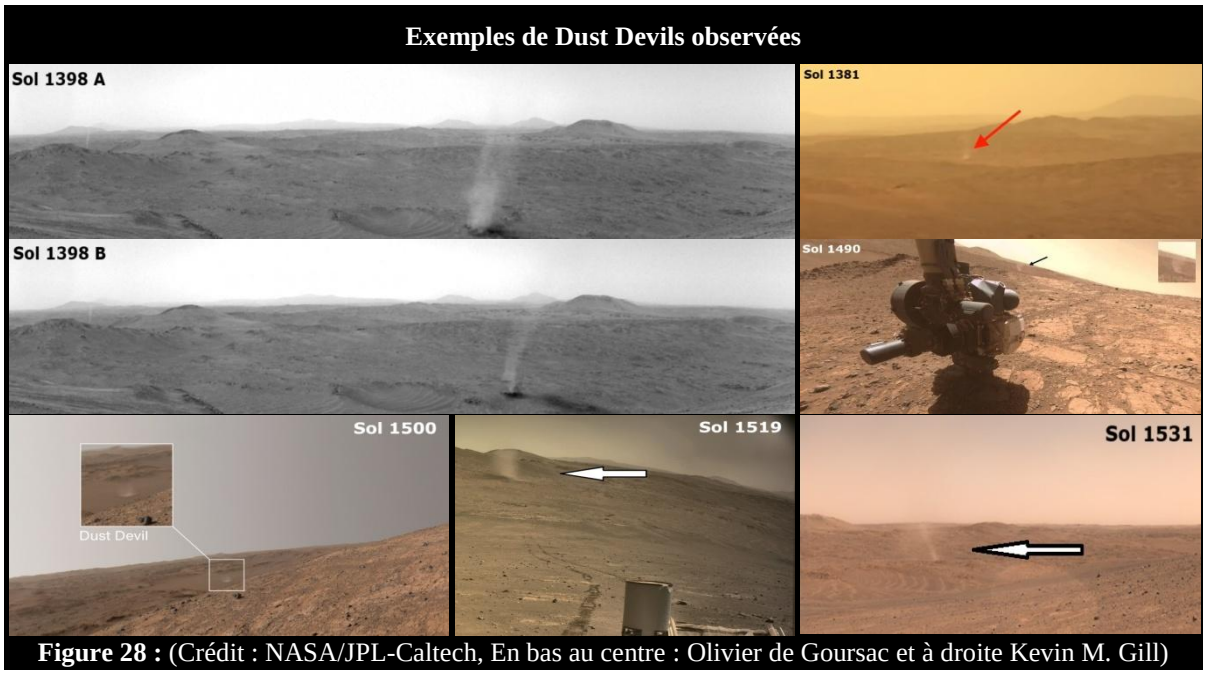


Figure 28 : (Crédit : NASA/JPL-Caltech, En bas au centre : Olivier de Goursac et à droite Kevin M. Gill)

[67] Mars 2020 initial reports (pdf)

CAMPAGNE DE NILI FOSSAE
(Sols 1704 à xxxx)

EN PRÉPARATION-----

L’aventure se poursuit sur le plancher riche en olivine de « Nili Fossae » à la sortie du cratère « Jezero » au Sol 1704 le 5 décembre 2025. Perseverance entame sa cinquième campagne scientifique baptisée « Northern Rim Campaign » (Campagne du Bord Nord) dans le cadre de sa mission sur la planète rouge. L'objectif est de collecter des échantillons qui devraient représenter une grande diversité des plus anciennes roches crustales (« Four Corners »), d’une unité régionale riche en olivine et en carbonate (« Gardevarri ») et des échantillons qui pourraient inclure des matériaux hydrothermaux ou issus d'impacts. Le lendemain sur le Sol 1705, l'équipe de la mission MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) de la NASA en orbite depuis 2014, en partenariat avec le réseau de communication avec l'espace lointain (Deep Space Network), a perdu définitivement le contact avec le vaisseau spatial lors de son passage derrière le soleil. Sa mission principale était d'étudier l'atmosphère supérieure de la planète Mars et de comprendre comment le vent solaire a provoqué la perte de ses composés volatils au fil du temps. Après plus d'une décennie de service et après avoir fait plusieurs tentatives de récupération avec la sonde, la NASA a officiellement déclaré la fin de sa mission en juin 2026 suite à une perte définitive de contact. Trois orbiteurs martiens restent toujours opérationnels pour assurer les communications entre la surface et les rovers, il s’agit de la sonde américaine Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) et des sondes Mars Odyssey et ExoMars Trace Gas Orbiter (EXTO) de l'ESA (Agence spatiale européenne).

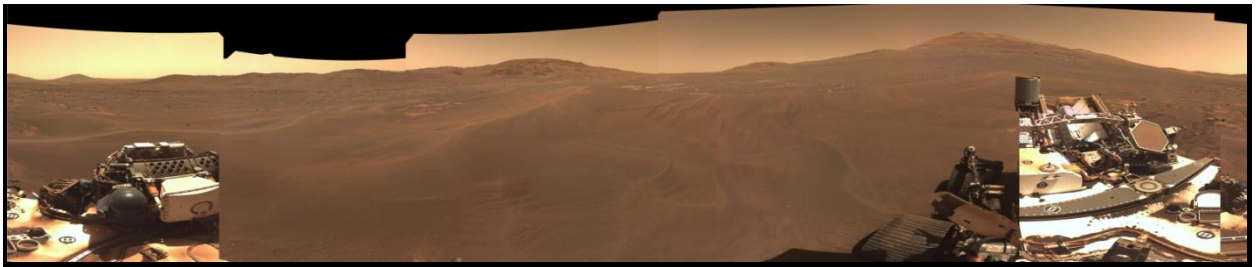


Figure 1 : Sol 1704 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

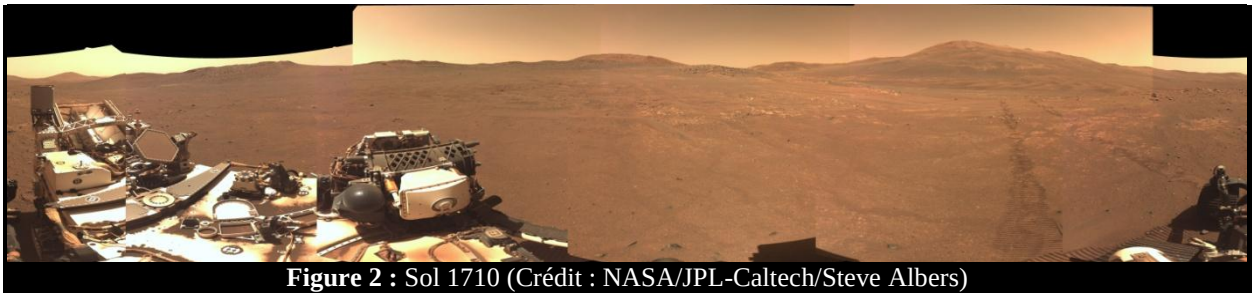


Figure 2 : Sol 1710 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Steve Albers)

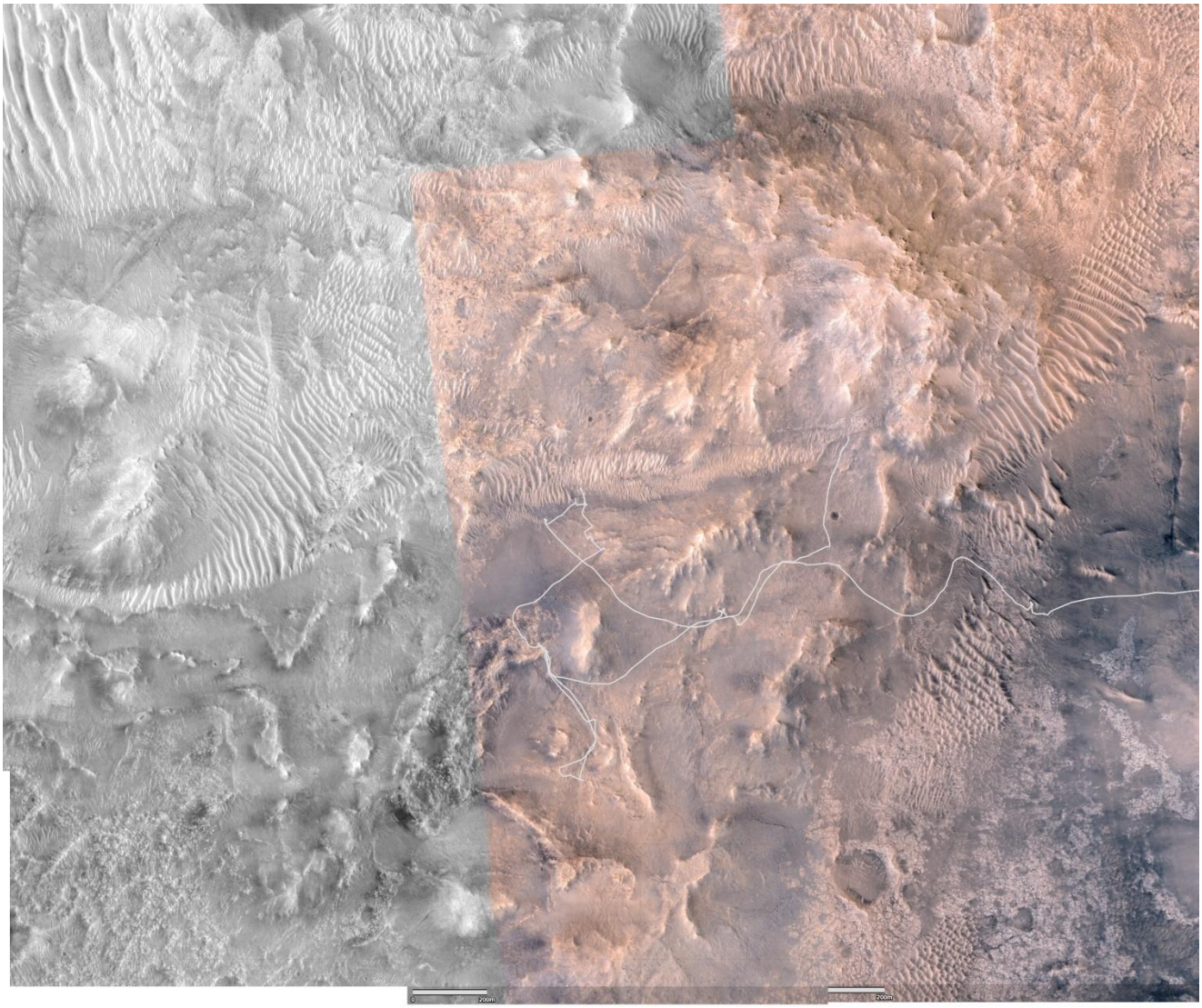


Planche 1 : Le trajet de Perseverance dans le cratère Jezero entre les Sols 1704 et …, du 5 décembre 2025 au … . Photo obtenu grâce aux données fournies par la caméra stéréo haute résolution à bord de l'orbiteur Mars Express de l'ESA et par la caméra haute définition HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Position et trajet sont du site de la NASA[68]. (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & ESA/DLR/FU-Berlin)

Après l'enquête menée sur la méga-ondulation de dune martienne dénommée « Hazyview » se trouvant dans la zone « Honeyguide » entre les Sols 1704 et 1707 (Figure 1). Le rover Perseverance effectue son premier déplacement sur Mars entièrement planifiés et assisté par une intelligence artificielle entre les Sols 1707 et 1709 du 8 au 10 décembre 2025. Il s'agit également du premier trajet planifié par une IA sur une autre planète. Cette démonstration a utilisé l'assistant IA générative Claude développé par Anthropic, pour analyser les données existantes de la mission de surface, dans le but de créer des points de passage ou de cheminement pour tracer l'itinéraire du l'astromobile, une tâche complexe de prise de décision habituellement effectuée par les planificateurs humains de la mission, généralement espacés de 100 mètres au maximum afin d'éviter tout danger potentiel. Pour les premiers trajets assister par l'IA, l'équipe a opté pour une

[68] Where is Perseverance?

Figure 3 : Sol 1767 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/ASU/Nev-T)

approche différente : l'intelligence artificielle générative a analysé les images orbitales haute résolution de la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) embarquée à bord de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), ainsi que les données de pente du terrain issues de modèles numériques d'élévation. Après avoir identifié les caractéristiques critiques du terrain (substratum rocheux, affleurements, champs de blocs dangereux, rides de sable, etc.), elle a généré et assemblé des segments de dix mètres pour former une trajectoire continue jalonnée de points de passage. Pour garantir que les instructions de l'IA Claude soient pleinement compatibles avec le logiciel de vol du rover, l'équipe d'ingénierie a également traité les commandes de pilotage via le « jumeau numérique » (réplique virtuelle du rover) du JPL, vérifiant plus de 500 000 variables de télémétrie avant d'envoyer les commandes sur Mars. Le 8 décembre, grâce aux points de passage générés par l'IA et mémorisés dans sa mémoire, Perseverance a parcouru 210 mètres au Sol 1707, et 246 mètres deux jours plus tard.

Figure 4 : Sol 1769 (NASA/JPL-Caltech/ASU)

L'astromobile reprend la route au Sol 1710 (Figure 2) en parcourant une distance de 85,89 mètres vers l'ouest, dans le but de rejoindre un site de stationnement pour se préparer à passer à travers la troisième conjonction solaire prévue entre le 29 décembre 2025 et le 20 janvier 2026 (Sols 1727-1749). Un vaste panorama couleur de 360° est entamé avec la MastCam-Z de droite (110 mm) entre le 18 décembre 2025 et le 25 janvier 2026 (Sols 1716-1754), composée d'une mosaïque de 980 images pour créer une vue du bord extérieur ouest du cratère « Jezero » a la hauteur du site « Crocodile Bridge » (Planche 2), qui inclut des images prises après le mouvement du bras au Sol 1754. On peut y voir au loin dans le haut de la partie droite de l'image, le trajet de la descente du rover le long des pentes de la partie extérieur de la crête nord-ouest du cratère « Jezero » (également visible au centre de la Planche 3, et dans la partie droite de la figure 4), soit le sommet de « Lookout Hill » (le petit sommet à gauche) culminant à plus de 145 mètres de haut, et avec un plus fort grossissement on peut même distinguer les traces du robot sur les pentes de la colline de droite, soit juste à gauche derrière les traces de roues du rover laissées sur le sol martien. Durant cette période de silence, le robot va exécuter en mode de gestion automatique des séquences d'observations d'une portion de sol et du ciel martien. La période des fêtes à cette époque coïncidait avec la conjonction de Mars et de la Terre, qui se produit tous les 26 mois en raison de leurs orbites différentes, la Terre et Mars situé à environ 362 millions de kilomètres sont masquées l'une et l'autre par le Soleil. Après un cours déplacement de 2,5 mètres au Sol 1713, le robot franchit le cap de son 40^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Une semaine après la sortie de la conjonction solaire, le rover reprend la route vers l'ouest en parcourant une distance de 200,24 mètres au Sol 1756.

L'astromobile teste pour la première fois une nouvelle technologie appelée Mars Global

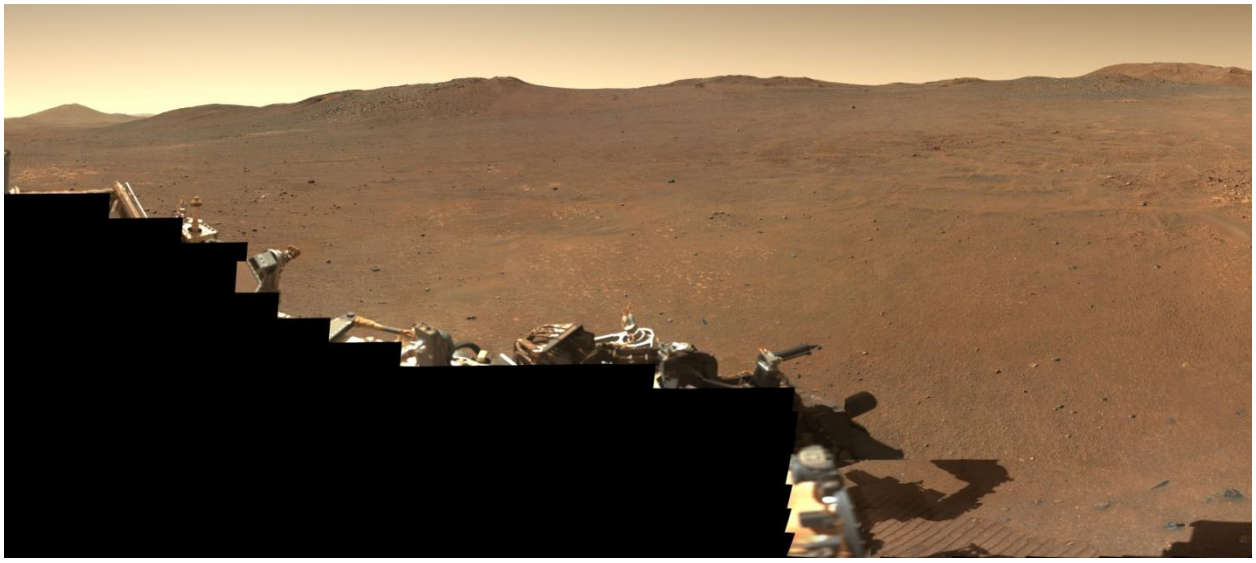


Planche 2 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de droite (110 mm) du site Crocodile Bridge au Sol 1717 le 19 décembre 2025. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

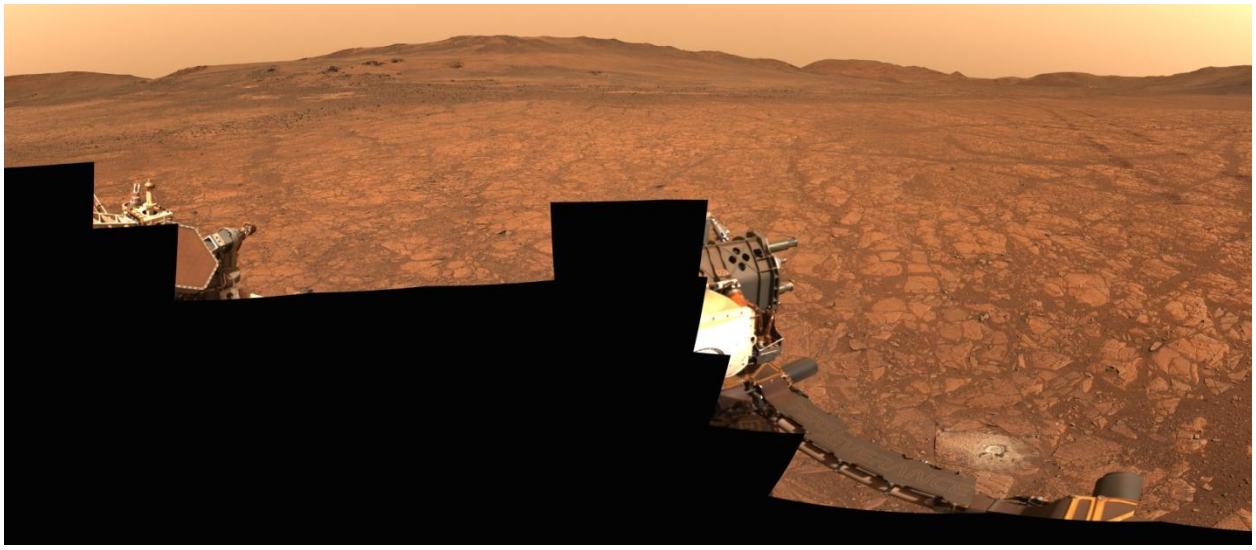


Planche 3 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Olifants au Sol 1775 le 16 février 2026. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 5 : Sol 1785
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU)

Localization de type GPS au Sol 1761 le 2 février 2026, pour aider à la localisation du rover sur Mars sans l'aide humaine, et qui sera renouvelé deux semaine plus tard sur le Sol 1775 le 16 février. La technologie comprend un algorithme qui compare rapidement les images panoramiques des caméras de navigation du rover avec les cartes de terrain orbitales embarquées. Fonctionnant sur un processeur puissant que Perseverance utilisait à l'origine pour communiquer avec Ingenuity, l'algorithme prend environ deux minutes pour localiser l'emplacement du rover à environ 25 centimètres près. L'astromobile reprend la route vers le sud-ouest au Sol 1762, et parcours une

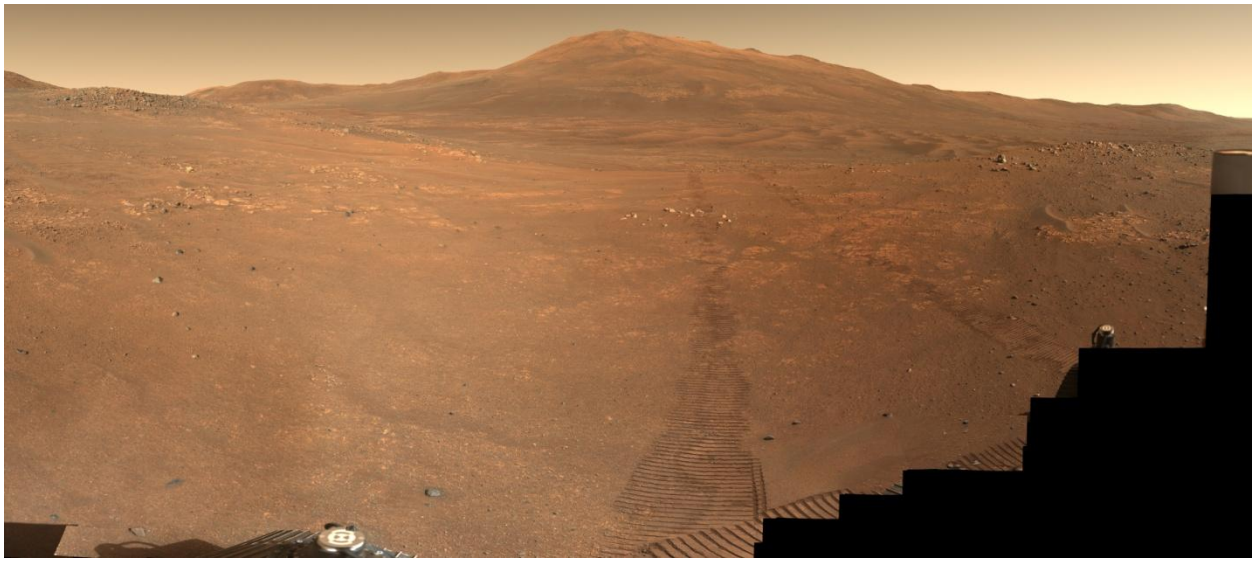


Planche 2 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de droite (110 mm) du site Crocodile Bridge au Sol 1717. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

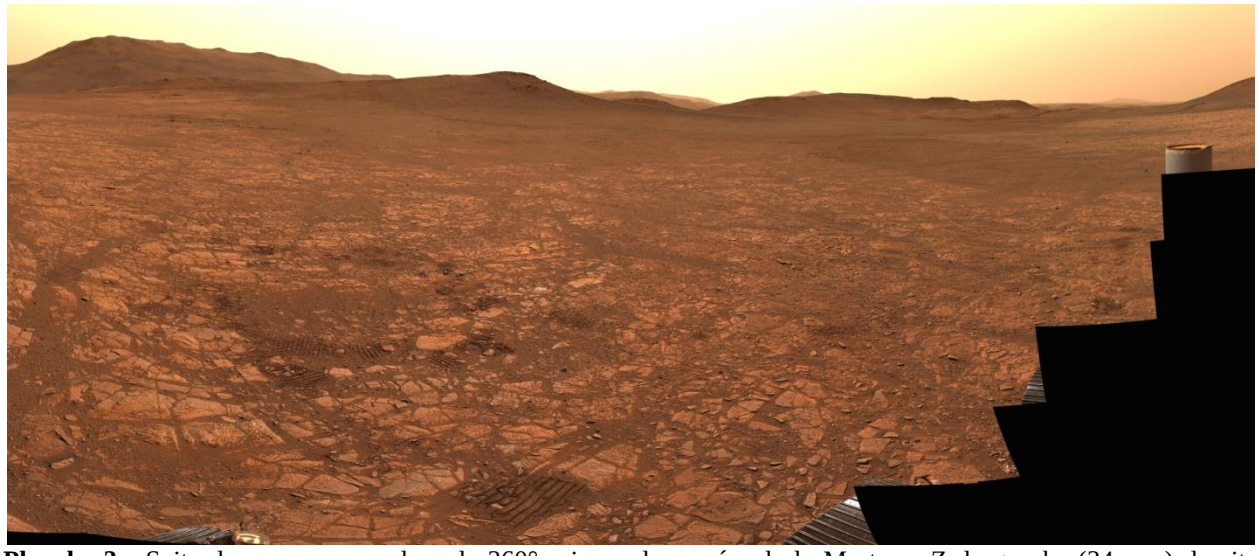


Planche 3 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Olifants au Sol 1775 le 16 février 2026. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

distance de 375,33 mètres effectué en trois séance de roulement quotidien jusqu'au Sol 1767 (Figure 3). L'objectif est de se rapprocher de la zone baptisée « Lac de Charmes », afin de faire la recherche de roches plus anciennes pouvant êtres antérieures à l'impact qui a créer le cratère « Jezero ». Une séance d'abrasion est ensuite exécutée sur une cible se trouvant sur un pavé d'affleurement rocheux au Sol 1769 (Sols 1769-1775) (Figure 4). Après l'étude du terrain, le robot fait un cours déplacement vers l'ouest de 34,74 mètres au Sol 1775 (Planche 3), et deux jours plus tard le rover Perseverance fête sa cinquième année à la surface de la planète Mars sur

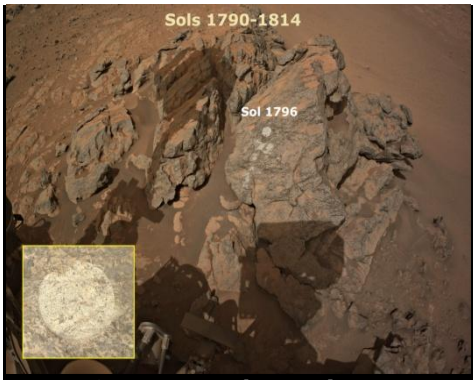


Figure 6 : Arethusa Sol 1796 (NASA/JPL-Caltech/ASU/Paul Hammond)

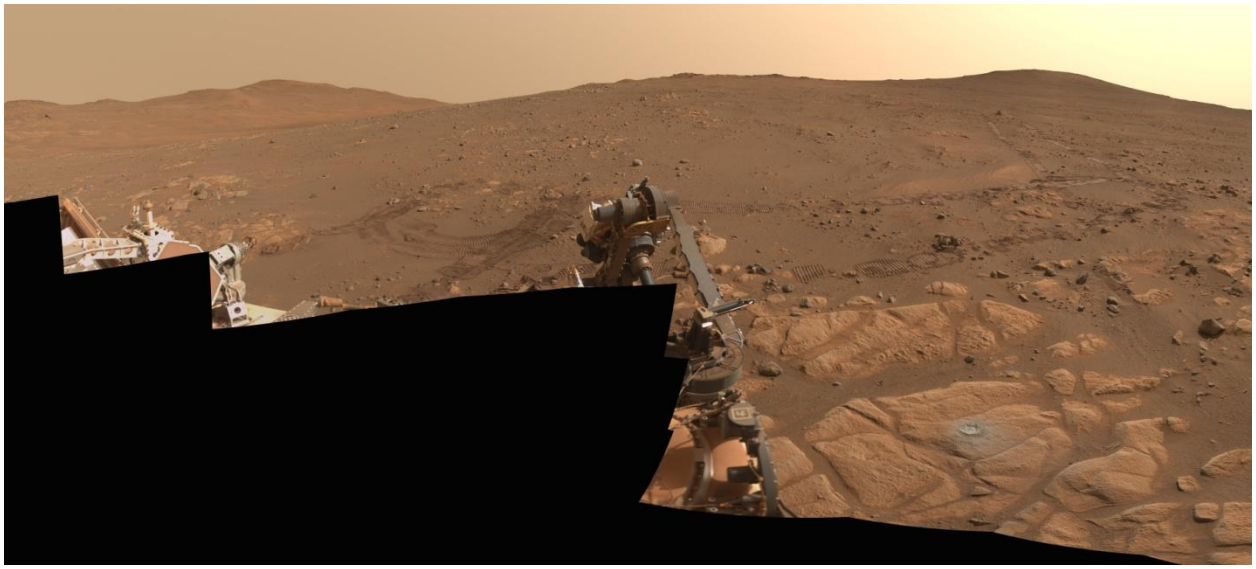


Planche 4 : Panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Vingeanne au Sol 1823 le 6 avril 2026. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

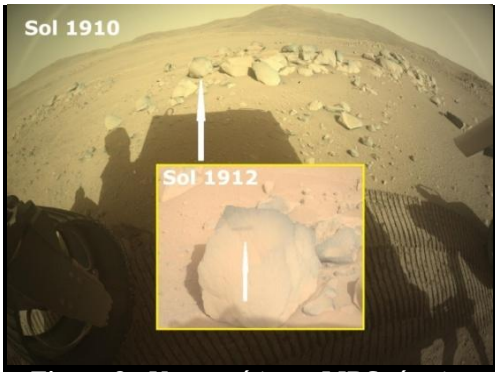


Figure 8 : Une expérience LIBS réussie, impliquant un alignement de dix impacts de tir laser, a été réalisée au Sol 1912 sur une cible rocheuse rencontrée au Sol 1910 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU Retraitement (c) Olivier de Goursac)

le Sol 1777 le 18 février 2026. Le robot se déplace ensuite vers un autre pavé d'affleurement rocheux et effectue une tentative d'abrasion sur une roche très résistante au Sol 1785 (Sols 1785-88), mais la roche c'est fracturé sous l'action de la carotteuse (Figure 5). Entre les Sols 1790 et 1792, l'astromobile se position devant un autres affleurement rocheux de plus grande taille surnommé « Arethusa » (Sols 1790-1814), qui se trouve un peut plus loin vers l'Est, et exécute avec beaucoup de difficulté, à cause de la dureté de la roche, une séance d'abrasion au Sol 1796 (Sols 1796-1805) le 10 mars 2026 (Figure 6). Contrairement au delta du cratère « Jezero », composé de roches sédimentaires, certaines roches ici semblent être des roches ignées extrusives (roches en fusion ayant atteint la surface sous forme de coulées de lave), et des impactites (roches créées ou modifiées par l'impact d'une météorite) qui se seraient formées avant le cratère, il y a environ 4 milliards d'années, offrant ainsi un aperçu de la croûte primitive profonde de la planète. Le lendemain sur le Sol 1797, l'astromobile qui est positionné à un endroit offrant une vue imprenable sur le rebord nord-ouest du cratère « Jezero », et du terrain environnant la zone de travail « Lac de Charmes ». Et dans le but de documenter la zone et d'immortalisé l'évènement, Perseverance entreprend le sixième selfie de la mission depuis l'atterrissage sur Mars en 2021, grâce à la caméra WATSON (Wide Angle Topographic Sensor for Operations and eNgineering) fixée à l'extrémité de son bras robotique. Le bras a effectué 62 mouvements précis en une heure environ pour créer une mosaïque composée de 61 images (Figure 7). Par la suite, le rover se déplace un peut autour de l'affleurement rocheux pour trouver un autre emplacement, puis une nouvelle tentative d'abrasion est effectuée sur la roche au Sol 1807 (Sols 1807-12). Le rover franchit le cap de son 41^{iem} kilomètre au Sol 1814 le 28 mars 2026.

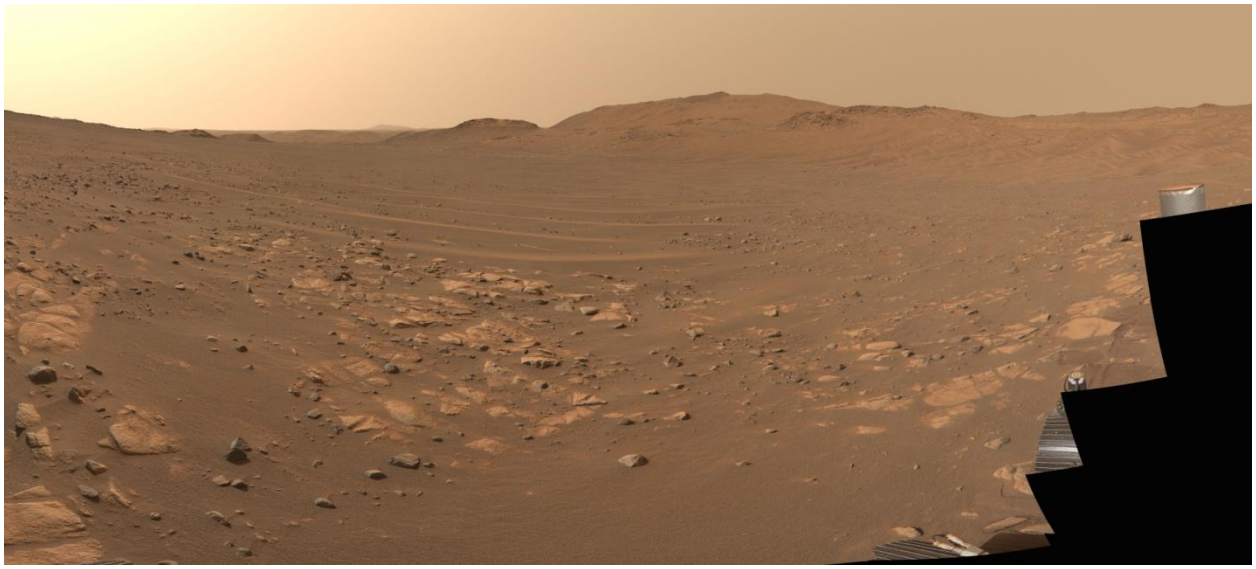
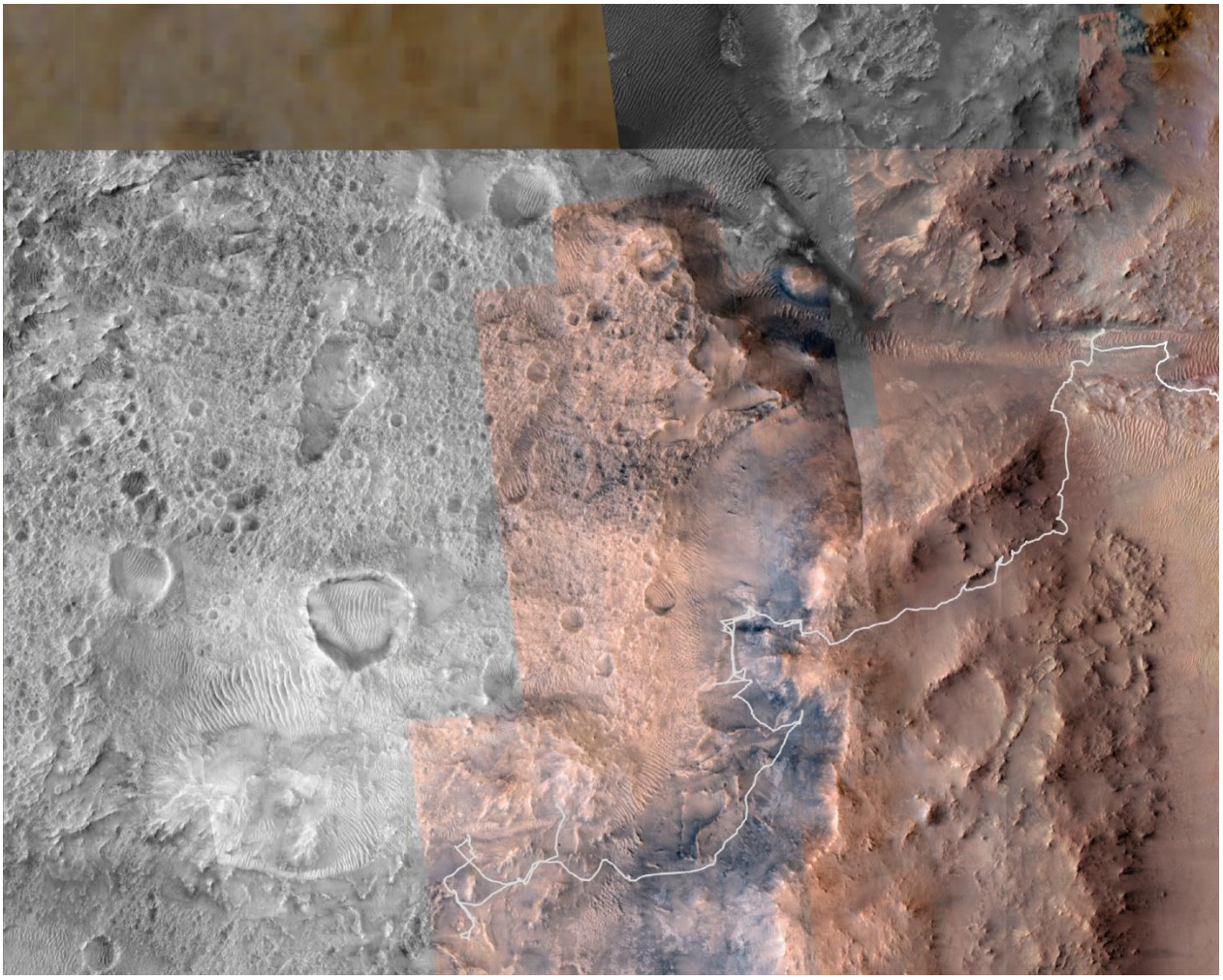


Planche 4 : Suite du panorama couleur de 360° pris par la caméra de la Mastcam-Z de gauche (34 mm) du site Vingeanne au Sol 1823 le 6 avril 2026. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS/Jim Bell & Jonathan Joseph)

Figure 7 : Perseverance devant Arethusa (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU Retraitement (c) Olivier de Goursac)

Nouvelle zone d'abrasion au Sol 1821 (Sols 1819-30) site Vingeanne (Planche 4). Nouvelle zone d'abrasion au Sol 1844 (Sols 1842-49). Nouvelle zone d'abrasion au Sol 1844 (Sols 1849-56). L'astromobile assiste à l'arrivée de son troisième solstice d'hivers dans l'hémisphère nord de la planète au Sol 1859 le 25 avril 2026. Après avoir étudié « Arethusa », Perseverance s'est dirigé vers le nord-ouest en direction de la zone « Arbot » au « Lac de Charmes » le 5 avril, Sol 1882. Une fois l'équipe satisfaite du travail accompli, le rover se dirigera vers le sud, en direction de « Gardevarri », un site présentant un affleurement particulièrement net de roches à olivine. Formées lors du refroidissement du magma, ces roches recèlent des informations précieuses pour mieux comprendre l'histoire volcanique de Mars et contextualiser les processus géologiques à grande échelle. De là, le rover devrait se diriger vers le sud-est, en direction d'une région que l'équipe a baptisée « Singing Canyon », afin d'approfondir ses connaissances sur la croûte primitive de la planète. Après plus de cinq ans d'opérations en surface, Perseverance a abrasé 62 roches, collecté 27 carottes de roche dans ses tubes d'échantillons (25 scellés, 2 non scellés) et parcouru près de 42 kilomètres.



ANNEXE

ANNEXE GÉNÉRALE

Calendrier des saisons martiennes (HN-Hémisphère Nord, HS-Hémisphère Sud)			
Equinoxe (1,56 UA)	**Solstice** (1,65 UA)	**Equinoxe** (1,45 UA)	**Solstice** (1,38 UA)
Printemps HN Automne HS	**Été HN Hiver HS**	**Automne HN Printemps HS**	**Hiver HN Été HS**
5 mars 2004	20 septembre 2004	23 mars 2005	17 août 2005
22 janvier 2006	8 août 2006	8 février 2007	5 juillet 2007
10 décembre 2007	25 juin 2008	26 décembre 2008	22 mai 2009
27 octobre 2009	13 mai 2010	13 novembre 2010	9 avril 2011
14 septembre 2011	30 mars 2012	30 septembre 2012	24 février 2013
1er août 2013	15 février 2014	18 août 2014	12 janvier 2015
19 juin 2015	3 janvier 2016	5 juillet 2016	29 novembre 2016
6 mai 2017	20 novembre 2017	23 mai 2018	17 octobre 2018
24 mars 2019	8 octobre 2019	9 avril 2020	3 septembre 2020
8 février 2021	25 août 2021	25 février 2022	22 juillet 2022
27 décembre 2022	13 juillet 2023	13 janvier 2024	8 juin 2024
12 novembre 2024	29 mai 2025	29 novembre 2025	25 avril 2026
30 septembre 2026	16 avril 2027	17 octobre 2027	12 mars 2028
17 août 2028	03 mars 2029	03 septembre 2029	28 janvier 2030
Source : https://www.planetary.org/articles/mars-calendar			

Liste des missions de l'exploration de la surface martienne								
Mission		**Date**				**Coordonnées**		**Site d'atterrissage**
		Départ	Arrivés	Fin	Durée (Sols-Jours)	Latitude	Longitude	
Les Missions Réussies								
Viking 1	USA	20-08-1975	20-07-1976	13-11-1982	2246 - 2306	22,27° N	47,95° W	Chryse Planitia
Viking 2	USA	09-09-1975	03-09-1976	11-04-1980	1281 - 1316	47,64° N	134,29° E	Utopia Planitia
Pathfinder	USA	04-12-1996	04-07-1997	27-09-1997	83 - 85	19,13° N	33,22° W	Ares Vallis
Spirit	USA	10-06-2003	04-01-2004	22-03-2010	2210 - 2269	14,57° S	175,47° E	Gusev Crater
Opportunity	USA	08-07-2003	25-01-2004	10-06-2018	5111 - 5250	1,95° S	5,53° W	Meridiani Planum
Phœnix	USA	04-07-2007	25-05-2008	02-11-2008	157 - 160	68,22° N	125,75° W	Vastitas Borealis
MSL Curiosity	USA	26-11-2011	06-08-2012	------	-	4,59 S	137,44° E	Gale Crater
InSight	USA	05-05-2018	26-11-2018	15-12-2022	1440 - 1480	4,5 N	135,9° E	Elysium Planitia
Mars 2020/Perseverance	USA	30-07-2020	18-02-2021	------	-	18,44° N	77,45° E	Jezero Crater
Tianwen-1/Zhurong	Chine	23-07-2020	14-05-2021	18-05-2022	361 - 369	25,1° N	109,92° E	Utopia Planitia
Les Missions Échouées								
Mars 2	Russe	19-05-1971	27-11-1971			45° S	47° E	Hellas Planitia
Mars 3	Russe	28-05-1971	02-12-1971			45° S	158° W	Ptolemaeus Crater
Mars 6	Russe	05-08-1973	12-03-1974			23,9° S	19,42° W	Margaritifier Sinus
Mars Polar Lander	USA	03-01-1999	03-12-1999			76° S	165° E	Planum Australe
Beagle 2	UK	02-06-2003	25-12-2003			11,53° N	269,5° W	Isidis Planitia
ExoMars/Schiaparelli	ESA	14-03-2016	19-10-2016			2,05° S	6,21° W	Meridiani Planum

Conjonction Solaire

	Tianwen-1 Zhurong (Utopia Planitia)		Mars 2020 Perseverance (Jezero Crater)		
	Date	**Sol**	**Date**	**Sol**	**Lieu**
1	30 sep au 18 oct. 2021	139-153	30 sep au 18 oct. 2021	218-235	Escarpement Martre
2			11 au 25 nov 2023	970-984	Upper Fan : Airey Hill
3			29 déc 2025 au 20 janv. 2026	1727-1749	Nili Fossae : Crocodile Bridge
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Sol et Lieux des Anniversaires

	Tianwen-1 Zhurong (14 mai 2021)			Perseverance (18 février 2021)		
Année	**Sol**	**Date**	**Lieu**	**Sol**	**Date**	**Lieu**
1	356	14 mai 2022	Utopia Planitia	355	18 février 2022	Cratère Adziilii
2				710	18 février 2023	Hawksbill Gap : Rocky Top
3				1065	18 février 2024	Upper Fan : Bunsen Peak
4				1421	18 février 2025	Crater Rim : Tablelands
5				1777	18 février 2026	Nili Fossae : Lac de Charmes
6					18 février 2027	
7						
8						
9						
10						
Année Martienne : Sol 669, Sol 1338, Sol 2007, Sol 2675, Sol 3344, Sol 4013, Sol 4681						

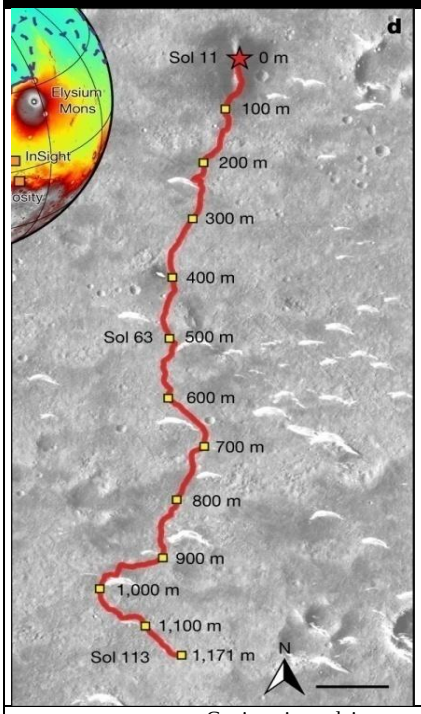
Record de Distance Parcourus sur un même Sol

Sojourner			Spirit			Opportunity			Curiosity			Perseverance		
Date	Sol	Distance (m)	Date	Sol	Distance (m)	Date	Sol	Distance (m)	Date	Sol	Distance (m)	Date	Sol	Distance (m)
28-07-1997	24	7	10-05-2004	125	**123.7**	20-03-2005	410	**219.89**	05-09-2013	385	**137,36**	10-09-2023	909	**473,92**

Kilométrage						
Zhurong			Perseverance			
km	Sol	Date	Sol	Date		
1	92	22-08-2021	130	02-07-2021		2021
2			177	19-08-2021		
3			340	03-02-2022		2022
4			353	16-02-2022		
5			381	17-03-2022		
6			386	22-03-2022		
7			394	30-03-2022		
8			400	05-04-2022		
9			405	11-04-2022		
10			414	20-04-2022		
11			432	08-05-2022		
12			538	25-08-2022		
13			606	03-11-2022		
14			668	06-01-2023		2023
15			714	22-02-2023		
16			719	27-02-2023		
17			753	03-04-2023		
18			763	13-04-2023		
19			838	29-06-2023		
20			903	04-09-2023		
21			929	01-10-2023		
22			959	01-11-2023		
23			1001	14-12-2023		
24			1041	24-01-2024		2024
25			1096	20-03-2024		
26			1142	07-05-2024		
27			1174	09-06-2024		
28			1227	02-08-2024		
29			1268	13-09-2024		
30			1293	09-10-2024		
31			1324	10-11-2024		
32			1351	07-12-2024		
33			1416	12-02-2025		2025
34			1509	19-04-2025		
35			1540	20-06-2025		
36			1577	28-07-2025		
37			1601	21-08-2025		
38			1686	17-11-2025		
39			1701	02-12-2025		
40			1713	14-12-2025		
41			1814	28-03-2026		2026
42			1877	01-06-2026		
43			1900	25-06-2026		
44			1940	05-08-2026		
45			1962	27-08-2026		
47						
48						

ANNEXE Tianwen-1 Zhurong

Relever pour chaque cent mètres parcourus

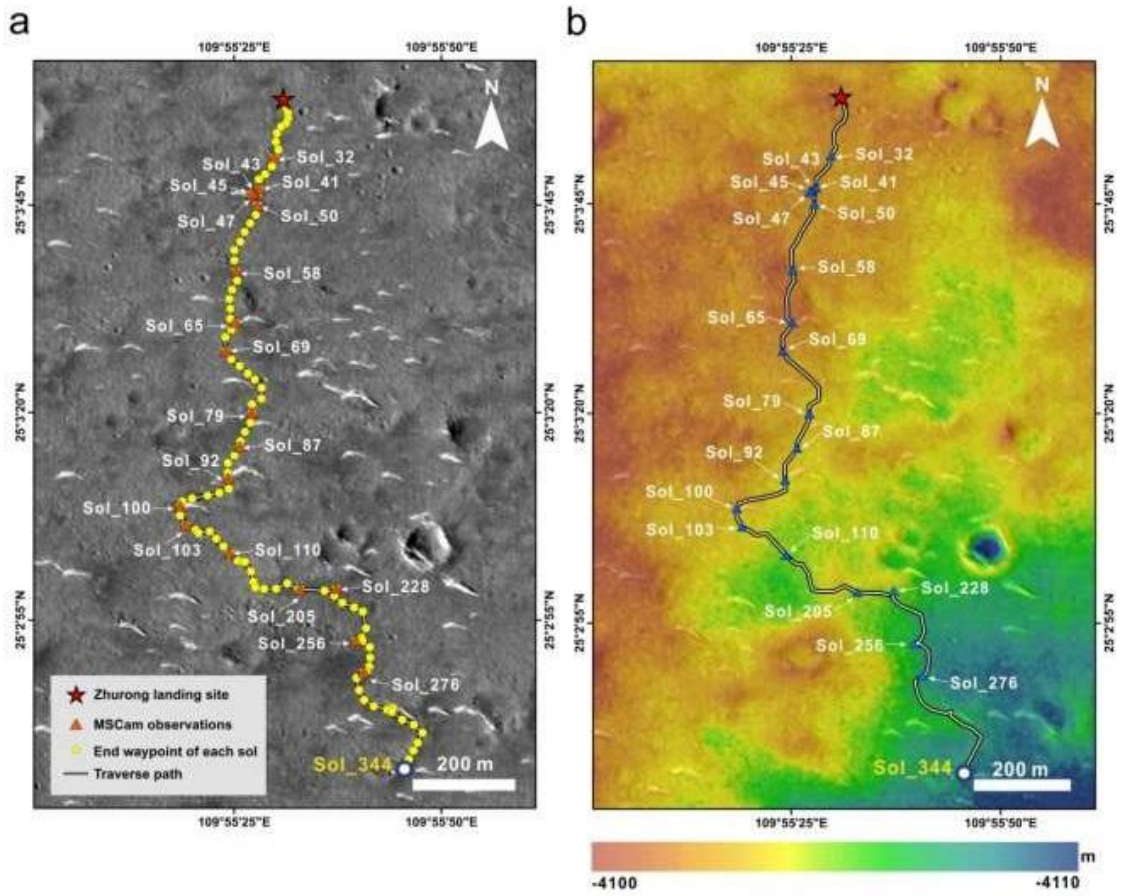


Sol	Date	Distance (mètre)	
29	11-06-2021	100	
40	23-06-2021	200	
53	07-07-2021	300	
58	12-07-2021	400	
63	17-07-2021	509	
71	27-07-2021	600	
78	02-08-2021	708	
82	06-08-2021	808	
94	18-08-2021	900	
102	26-08-2021	1000	
108	01-09-2021	1100	
166	29-10-2021	1200	
201	08-12-2021	1300	
242	16-01-2022	1400	
256	30-01-2022	1500	
282	01-03-2022	1600	
	?-03-2022	1700	
311	29-03-2022	1800	
325	12-04-2022	1900-21	
361	18-05-2022	1921	

Conjonction solaire entre les Sols 113 et 163
En Rouge : Incertitude sur les données

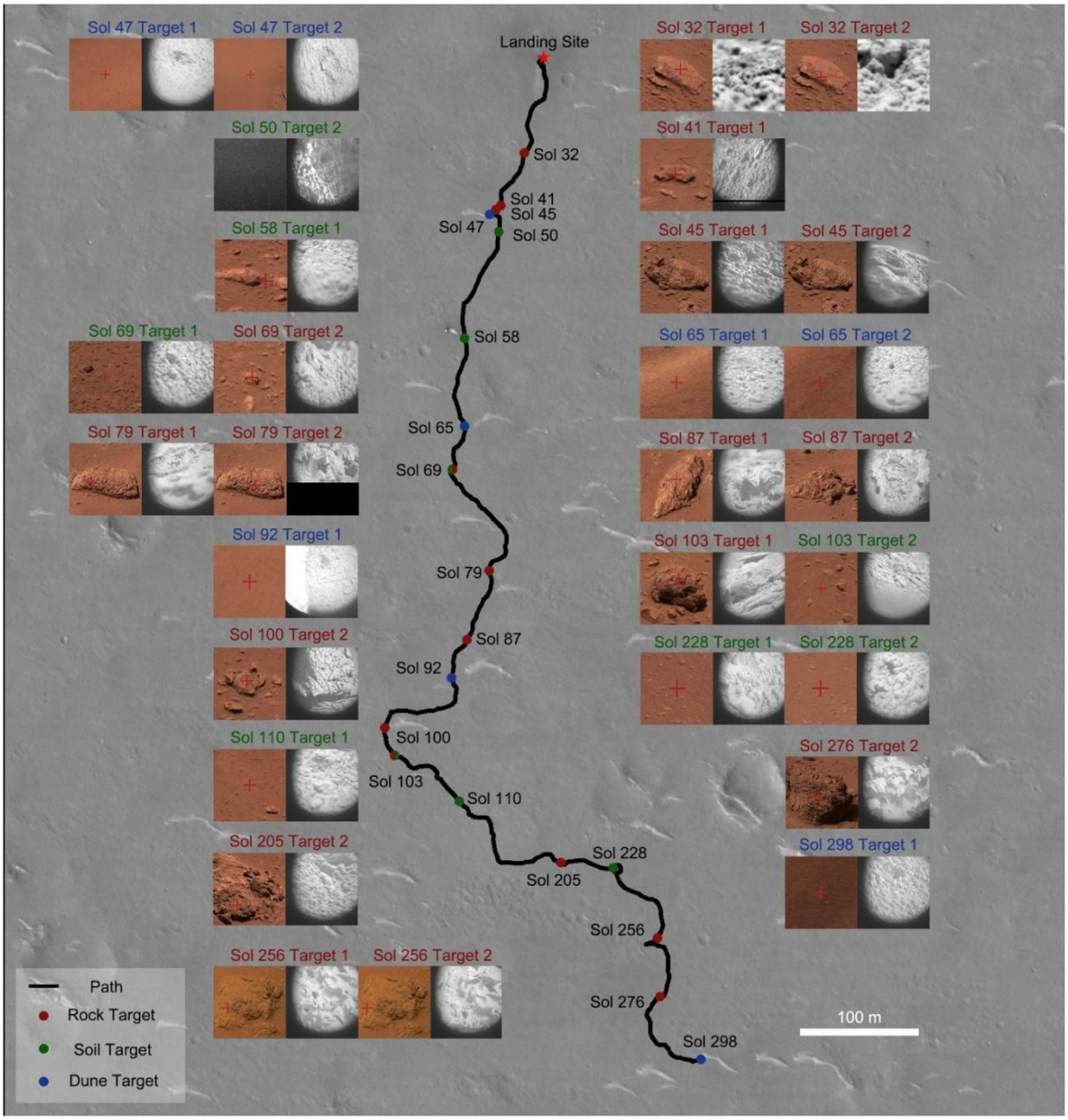
Cibles des spectromètres infrarouges SWIR et LIBS de MarSCoDe (44 cibles scientifiques jusqu'au Sol 298)						
Spectromètre		**Sol**	**Date**	**Heure (cibles)**	**Distance (m)**	**Cible**
SWIR (réflectance) (850 nm à 2400 nm)	1	32	15-06-2021	17:42:31 - 17:54:31		
	2	43	26-06-2021	00:04:35 - 00:12:22		
	3	47	01-07-2021	02:41:55 - 02:49:42		
	4	58	12-07-2021	09:18:50 - 09:32:41		
	5	65	19-07-2021	16:49:05 - 17:02:56		
	6	79	03-08-2021	02:00:34 - 02:14:25		
	7	92	16-08-2021	09:45:11 - 09:59:02		
	8	100	24-08-2021	14:26:52 - 14:40:43		
	9	103	27-08-2021	16:18:12 - 16:32:03		
	10	110	03-09-2021	20:51:15 - 21:05:06		
	11	276	21-02-2022	08:48:48 - 09:02:39		
LIBS (Laser) (240 et 850 nm) Roches Ignées Duricroûtes Lithifiées Duricrusts Cimentés	1	21	04-06-2021	13:12:44 - 13:13:04 13:24:42 - 13:25:02	4.0492 2.9138	Ad-Ad
	2	32	15-06-2021	17:37:12 - 17:37:33 17:49:10 - 17:49:31	3.5133 3.4132	S-R
	3	41	25-06-2021	03:42:10 - 03:42:31 03:54:29 - 03:54:50	4.2298 3.3846	S-S
	4	43	26-06-2021	23:28:44 - 23:29:05	3.1756	S
	5	45	29-06-2021	07:31:02 - 07:31:23 07:43:21 - 07:43:42	3.1297 2.6978	T-R
	6	47	01-07-2021	02:29:36 - 02:29:57 02:41:55 - 02:42:16	2.3373 2.9832	T-T
	7	50	04-07-2021	10:47:45 - 10:48:06 11:00:04 - 11:00:25	4.1733 2.7001	S-S
	8	58	12-07-2021	09:13:10 - 09:13:31 09:26:59 - 09:27:20	2.9216 2.9454	S-S
	9	65	19-07-2021	16:43:25 - 16:43:46 16:57:14 - 16:57:35	2.9832 3.0263	T-T
	10	69	23-07-2021	19:20:57 - 19:21:18 19:34:46 - 19:35:07	2.7160 2.8879	S-R
	11	79	03-08-2021	01:54:54 - 01:55:15 02:08:43 - 02:09:04	1.9108 1.8332	R-R
	12	87	11-08-2021	07:10:11 - 07:10:32 07:24:00 - 07:24:21	2.3684 3.4096	R-R
	13	92	16-08-2021	09:39:31 - 09:39:52 09:53:20 - 09:53:41	2.5669 3.0067	T-T
	14	100	24-08-2021	14:35:01 - 14:35:22	3.1479	R
	15	103	27-08-2021	16:12:32 - 16:12:53 16:26:21 - 16:26:42	2.7767 2.5067	R-S
	16	110	03-09-2021	20:45:35 - 20:45:56 20:59:24 - 20:59:45	2.2679 2.2731	S-S
	17	205	12-12-2021			R
	18	228	04-01-2022			S-S
	19	256	30-01-2022			R-R
	20	276	21-02-2022			R
	21	298	16-03-2022			T
Types de cibles : R : Roche, S : Sol, T : TAR, Ad : Aucune Détection						

-Constraints on water activity at the Zhurong landing site in Utopia Planitia, May 2023
https://www.researchgate.net/publication/370593287_Constraints_on_water_activity_at_the_Zhurong_landing_site_in_Utopia_Planitia_Mars
-In situ analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars
https://www.researchgate.net/publication/369021027_In_situ_analysis_of_surface_composition_and_meteorology_at_the_Zhurong_landing_site_on_Mars
-Volatile Elements Characterized by MarSCoDe in Materials at Zhurong Landing Site
https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ad6560



Caméra multispectrale (MSCam) et roches sédimentaires marines :
Carte géologique de la traversée du rover Zhurong. La carte de base est une image de la caméra d'imagerie haute résolution (HiRIC) (~ 0,7 m par pixel) recouvert par un modèle de terrain numérique HiRIC à bord de l'orbiteur martien TW-1 (~ 3,5 m par pixel). Les points orange sont les lieux d'observation (MSCam) du rover Zhurong. L'étoile rouge montre le site d'atterrissage. La différence d'altitude entre le site d'atterrissage et le point de rupture (Sol 344) est d'environ 5 mètres. Crédit : Science China Press

-In-situ observations of marine sedimentary rocks suggest ancient northern ocean on Mars
https://phys.org/news/2023-05-in-situ-marine-sedimentary-ancient-northern.html#google_vignette



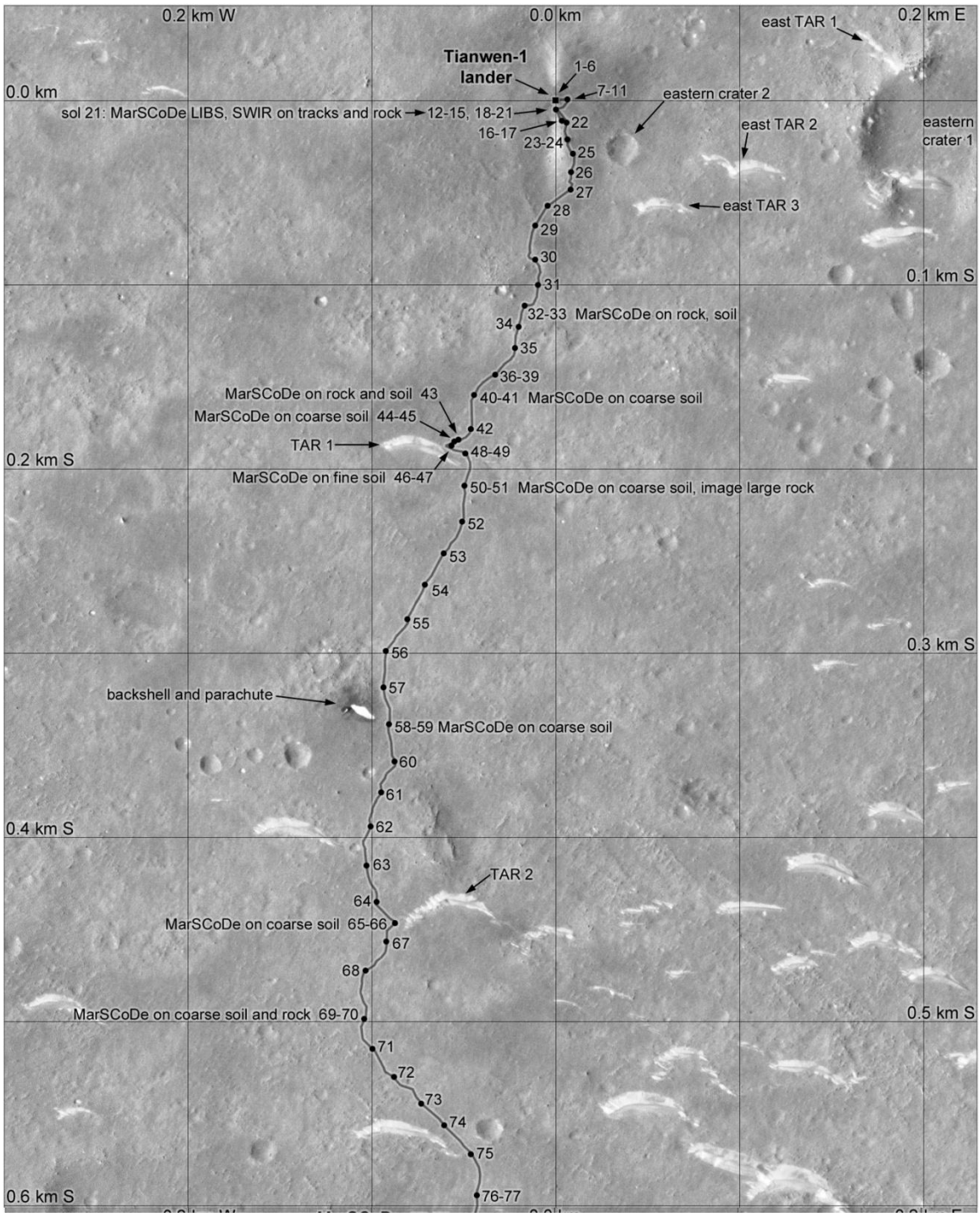
Cibles du laser LIBS de l'unité de détection MarSCoDe (>= Sol 299, 16 roches, 7 sols et 6 dunes**)**
Le rouge représente les cibles rocheuses, le vert représente les cibles du sol et le bleu les matériaux des dunes. Pour les images de chaque cible, la gauche prise par les caméras de navigation et de terrain (NaTeCam) affiche la cible analysée et le centre de l'image de droite prise par la caméra de micro-imagerie MarSCoDe montre le point d'ablation laser.

-Volatile Elements Characterized by MarSCoDe in Materials at Zhurong Landing Site
https://www.researchgate.net/figure/The-traverse-of-the-Zhurong-rover-and-the-targets-analyzed-in-this-work-Red-is-rock_fig1_383972568

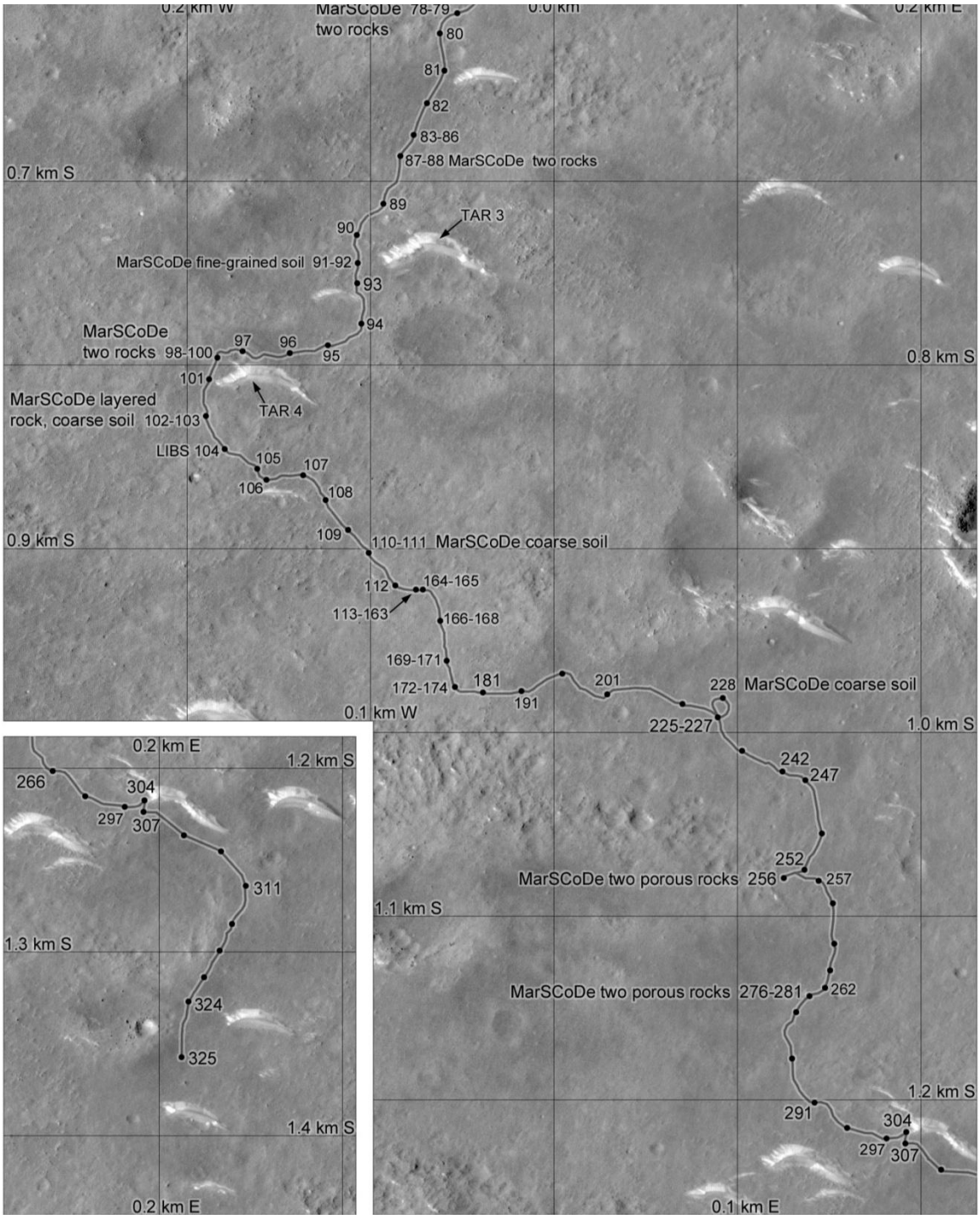
Date	Sols	$B_{body,\,x}$ (nT)	$B_{body,\,y}$ (nT)	$B_{mars,\,N}$ (nT)	$B_{mars,\,E}$ (nT)	$B_{crust,\,N}$ (nT)	$B_{crust,\,E}$ (nT)
2021-06-04	21	63.70±3.12	-82.60±1.84	-1.02±3.78	-0.32±2.41	-4.71±4.20	3.48±3.04
2021-06-15	32	64.30±3.08	-82.40±1.82	8.21±2.15	2.76±1.87	4.53±2.81	6.56±2.64
2021-06-25	41	67.70±2.93	-80.70±1.79	-16.91±2.32	11.21±3.20	-20.59±2.94	15.01±3.70
2021-06-26	43	114.50±6.82	-57.90±6.83	-1.25±3.16	24.11±7.49	-4.93±3.64	27.91±7.72
2021-06-29	45	72.50±3.20	-78.30±2.07	-20.48±1.57	27.77±2.48	-24.16±2.40	31.57±3.10
2021-07-01	47	114.90±6.93	-57.70±6.90	21.78±2.15	26.11±7.31	18.10±2.81	29.91±7.54
2021-07-04	50	70.90±3.22	-79.10±2.00	-9.71±2.57	-2.00±4.58	-13.39±3.15	1.80±4.94
2021-07-12	58	116.40±6.90	-57.00±7.04	27.50±6.52	5.44±4.70	23.82±6.77	9.24±5.05
2021-07-19	65	63.10±3.09	-82.90±1.83	9.73±1.38	-3.43±2.19	6.04±2.28	0.37±2.88
2021-07-23	69	62.50±2.99	-83.20±1.80	-12.93±2.31	-1.22±5.08	-16.62±2.94	2.58±5.41
2021-08-03	79	62.80±3.21	-83.10±1.88	-17.81±2.47	3.88±6.64	-21.50±3.07	7.68±6.89
2021-08-11	87	62.80±3.10	-83.10±1.84	-3.51±2.69	1.18±5.79	-7.19±3.25	4.98±6.08
2021-08-16	92	66.10±3.08	-81.50±1.82	-4.77±2.13	2.71±5.17	-8.46±2.80	6.51±5.49
2021-08-24	100	68.20±2.98	-80.50±1.82	-3.07±2.15	9.01±2.40	-6.76±2.81	12.81±3.03
2021-08-27	103	70.20±3.05	-79.50±1.91	-5.53±3.16	-9.21±3.32	-9.22±3.64	-5.41±3.80
2021-09-03	110	72.40±3.17	-78.40±2.05	7.06±3.97	0.20±4.11	3.38±4.36	4.00±4.51

Extended Data Fig. 4 | The calculated rover body field. Martian magnetic fields. and crustal fields along with the uncertainties. respectively. The universal time

Le champ du corps du rover, les champs magnétiques martiens et les champs de la croûte terrestre calculés ainsi que les incertitudes, respectivement.
https://www.nature.com/articles/s41550-023-02008-7/figures/8



Carte du trajet de l'astromobile chinois Zhurong entre les Sols 1 et 325. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 11 Juin 2021. Position et trajet des rovers guidés par les cartes de la Nasa et de Philip J. Stooke.



Suite du trajet de l'astromobile chinois Zhurong entre les Sols 1 et 325. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 11 Juin 2021. Position et trajet des rovers guidés par les cartes de la Nasa et de Philip J. Stooke.

ANNEXE Mars 2020 Perseverance

Liste des Échantillons Scellées de Perseverance

	Date	Sol	Nom	Location (Affle-Roche)	Secteur	Localisation actuelle	Type d'échantillon	Hauteur de l'échantillon (cm)	Élévation -2 568 m	Type de roche
1	06-08-2021	164	Roubion	Roubion	Polygon Valley	Depot 1	Atmospheric	n/a	-2584.96	n/a
2	06-09-2021	194	Montdenier	Rochette	Artuby Ridge	Depot 1	Roche	5.98	-2574.553	Ignée
3	08-09-2021	196	Montagnac	Rochette	Artuby Ridge	Rover	Roche	6.14	-2574.553	Ignée
4	15-11-2021	262	Salette	Brac	South Séítah	Rover	Roche	6.28	-2569.2	Ignée
5	24-11-2021	271	Coulettes	Brac	South Séítah	Depot 1	Roche	3.30	-2569.2	Ignée
6	22-12-2021	298	Robine	Issole	South Séítah	Rover	Roche	6.08	-2574.3	Ignée
7	31-01-2022	337	Malay	Issole	South Séítah	Depot 1	Roche	3.07	-2574.3	Ignée
8	07-03-2022	371	Ha'ahóni (aka "Hahonih")	Sid	Octavia E. Butler Landing / Ch'ał outcrop	Rover	Roche	6.50	-2568.357	Ignée
9	13-03-2022	377	Atsáh (aka "Atsah")	Sid	Octavia E. Butler Landing / Ch'ał outcrop	Depot 1	Roche	6.00	-2568.357	Ignée
Fin de la Campagne du Fond du Cratère (Crater Floor Campaign) (Sols 0 à 421)										
10	07-07-2022	490	Swift Run	Skinner Ridge	Hawksbill Gap	Rover	Roche	6.69	-2520.185	Sédimentaire
11	12-07-2022	495	Skyland	Skinner Ridge	Hawksbill Gap	Depot 1	Roche	5.85	-2520.185	Sédimentaire
12	27-07-2022	509	Hazeltop	Wildcat Ridge	Hawksbill Gap	Rover	Roche	5.97	-2523.097	Sédimentaire
13	03-08-2022	516	Bearwallow	Wildcat Ridge	Hawksbill Gap	Depot 1	Roche	6.24	-2523.078	Sédimentaire
14	02-10-2022	575	Shuyak	Amalik	Cape NukShak	Rover	Roche	5.55	-2526.323	Sédimentaire
15	16-11-2022	619	Mageik	Amalik	Cape NukShak	Depot 1	Roche	7.36	-2526.292	Sédimentaire
16	29-11-2022	631	Kukaklek	Hidden Harbor	Cape NukShak	Rover	Roche	4.97	-2517.094	Sédimentaire
17	02-12-2022	634	Atmo Mountain	Observation Mountain	Cape NukShak	Rover	Régolithe	5.30	-2525.062	grains sédimentaires et ignés mélangés
18	07-12-2022	639	Crosswind Lake	Observation Mountain	Cape NukShak	Depot 1	Régolithe	5.30	-2524.978	grains sédimentaires et ignés mélangés
Fin de la Campagne du Front du Delta (Fan Front Campaign) (Sols 422 à 710)										
19	30-03-2023	749	Melyn	Berea	Tenby	Rover	Roche	6.04	-2448.913	Sédimentaire
20	23-06-2023	832	Otis Peak	Emerald Lake	Powell Peak	Rover	Roche	5.77	-2421.026	Sédimentaire
21	15-09-2023	913	Pilot Mountain	Dream Lake	Hague Creek	Rover	Roche	6.00	-2417.740	Sédimentaire
Fin de la Campagne du Sommet du Delta (Upper Fan Campaign) (Sols 711 à 909)										
22	25-09-2023	923	Pelican Point	Hans Amundsen Memorial	Mandu Wall	Rover	Roche	6.10	-2448.913	Sédimentaire
23	21-10-2023	949	Lefroy Bay	Lake Newell	Turquoise Bay	Rover	Roche	4.70	- 2407.642	Sédimentaire
24	12-03-2024	1088	Comet Geyser	Bunsen Peak	Margin Unit	Rover	Roche	5,78	-2382.434	Carbonate cimenté à la silice
Fin de la Campagne de l'unité Marginale (Margin Campaign) (Sols 910 à 1159)										
25	21-07-2024	1215	Sapphire Canyon	Cheyava Falls	Bright Angel : Beaver Falls	Rover	Roche	6,2	- 2354.236	Sédimentaire
Fin de la Campagne Neretva Vallis (Margin Campaign) (Sols 1160 à 1245)										
26	28-01-2025	1401	Silver Mountain	Shallow Bay	Witch Hazel Hill	Rover	Roche	2.91	-1820.052	Ignée/impactite
27	02-03-2025	1433	Green Gardens	Tablelands	Witch Hazel Hill	Rover	Roche	7.19	- 1821.051	Serpentinite
28	10-03-2025	1441	Main River	Broom Point	Witch Hazel Hill	Rover	Roche	4.32	-1919.036	Ignée/impactite
29	TBD	1490	Bell Island	Pine Pond	Witch Hazel Hill	Rover	Roche	1.7	-1925.65	Ignée/impactite
30	TBD	1552	Gallants	North Twin Lake	Salmon Point/ Krokodillen	Rover	Roche	1.91	-1938.75	Ignée /Sédimentaire
Fin de la Campagne du bord du cratère (Crater Rim/Witch Hazel Hill)										
31										

Liste des Tubes Témoins Scellées de Perseverance									
	Date	**Sol**	**Nom**	**Location (Affleur.-Roche)**	**Lieu d'échantillonnage**	**Élévation** -2 568 m	Campaign	**Type d'échantillon**	**Tube No**
1	22-06-2021	120	WB1		North Séitah	-2568.073	Crater Floor	Witness Tube 1/5	61
2	16-07-2022	499	WB2	Skinner Ridge	Hawksbill Gap	-2521.454	Fan Front	Witness Tube 2/5	205
3	14-10-2022	586	WB3	Amalik	Cape NukShak	-2526.327	Fan Front	Witness Tube 3/5	188
4									
5									

Sur les 43 tubes en titane que Perseverance a amenés sur Mars, 38 sont destinés au prélèvement d'échantillons, et cinq sont des « tubes témoins » conçus pour documenter la propreté de son système d'échantillonnage tout au long de la mission. Trois tubes témoins ont été scellés : le Sol 120 (no 61, 22 juin 2021), le Sol 499 (no 205, 16 juillet 2022) et le Sol 586 (no 188, 14 octobre 2022). Le troisième tube témoin, scellé au lieu d'échantillonnage « Amalik », a été placé dans le dépôt d'échantillons de secours du rover.

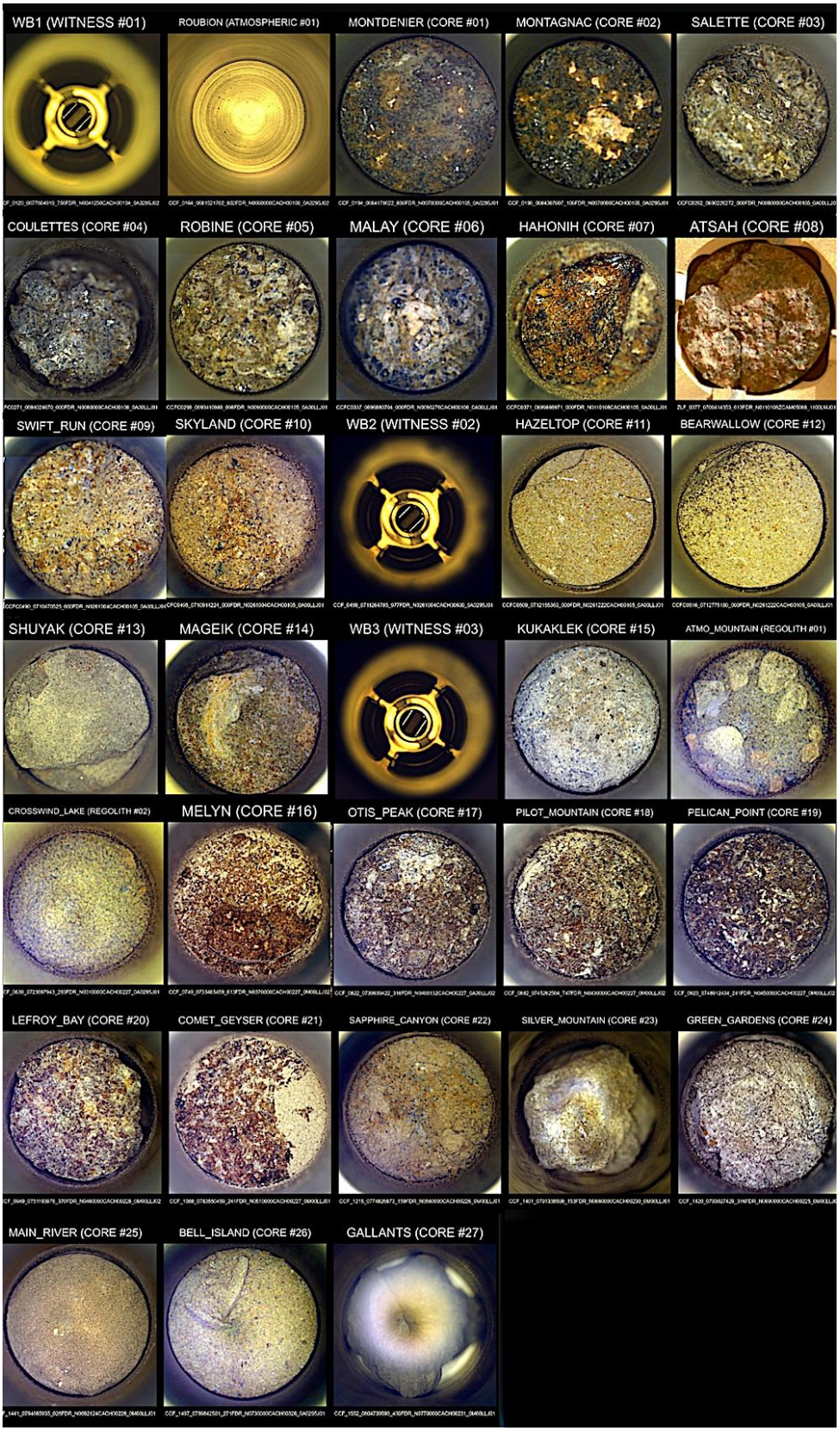
Sample Designation	Sample Name	Coring Bit number
M2020-120-1	WB1	WB
M2020-164-2	Roubion	5
M2020-190-3	Montdenier	6
M2020-196-4	Montagnac	6
M2020-262-5	Salette	5
M2020-271-6	Coulettes	1
M2020-295-7	Robine	2
M2020-337-8	Malay	2
M2020-371-9	Hahonih	3
M2020-374-10	Atsah	4
M2020-490-11	Swift Run	1
M2020-495-12	Skyland	1
M2020-499-13	WB2	WB
M2020-509-14	Hazeltop	2
M2020-516-15	Bearwallow	2
M2020-575-16	Shuyak	4
M2020-579-17	Mageik	4
M2020-586-18	WB3	WB
M2020-623-19	Kukaklek	5
M2020-634-20	Atmo Mountain	Regolith
M2020-639-21	Crosswind Lake	Regolith
M2020-749-22	Melyn	1
M2020-822-23	Otis Peak	1
M2020-882-24	Pilot Mountain	4
M2020-923-25	Pelican Point	4
M2020-949-26	Lefroy Bay	4
M2020-1088-27	Comet Geyser	4
M2020-1215-28	Sapphire Canyon	1
M2020-1401-29	Silver Mountain	4
M2020-1420-30	Green Gardens	1
M2020-1441-31	Main River	4
M2020-1483-32U	Bell Island	3
M2020-1552-33U	Gallants	1

Coring Bit Number	Count
1	8
2	4
3	2
4	9
5	5
6	0
Regolith	2
WB	3
Total	33

Les différents types (mèche de carottage et foret d'abrasion) avec le nombre de fois que chacune des mèches de carottage a été utilisé sur Mars. (Crédit :)

- PNAS : Sampling Mars: Geologic context and preliminary characterization of samples collected by the NASA Mars 2020 Perseverance Rover Mission, September 25, 2024
https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.2404255121
- Mars 2020 Initial Reports Volume
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mars2020/returned_sample_science.htm
Échantillons : https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/mars-rock-samples/
Perseverance Mars Rock Sample Montage : https://science.nasa.gov/resource/perseverance-mars-rock-sample-montage/

Les 33 tubes d'échantillons collectés par Mars Perseverance :



À ce jour (24 juillet 2025, Sol 1574), Perseverance a collecté 27 carottes de roche, deux échantillons de régolithe (roche et poussière martiennes fragmentées) et un échantillon atmosphérique. Le composite comprend également des images de l'intérieur des trois tubes témoins (WB : Witness).

Il est notable de signaler que les deux derniers tubes de prélèvements remplis n'ont pas été scellés (TBD), et, sont susceptibles d'être ultérieurement vidés de leurs contenus, pour être réutilisés en vu d'en recueillir d'autres potentiellement plus intéressants sur le plan scientifique. Il reste donc 8 tubes pour échantillonner le sol martien.

https://science.nasa.gov/photojournal/the-33-sample-tubes-collected-by-perseverance/
https://www.jpl.nasa.gov/images/pia26643-the-33-sample-tubes-collected-by-perseverance/
https://astrobiology.com/2025/07/the-33-sample-tubes-collected-by-mars-perseverance.html

Liste des Carottages avec leur Patchs d'Abrasion			
Campagne géologique	**Roche / Régolithe cible**	**Nom du Patch d'Abrasion**	**Carottage(s) Associé(s)**
Crater Floor (Fond du cratère) Sols 1 à 400	Roubion	Guillaumes	**Roubion**
	Rochette	Bellegarde	**Montdenier** / Montagnac
	Brac	Dourbes	Salette / **Coulettes**
	Issole	Quartier	Robine / **Malay**
	Sid	Alfalfa	Hahonih / **Atsah**
Delta Front (Front du delta) Sols 400 à 750	Skinner Ridge	Thornton Gap	Swift Run / **Skyland**
	Wildcat Ridge	Berry Hollow	Hazeltop / **Bearwallow**
	Amalik	Novarupta	Shuyak / **Mageik**
	Hidden Harbor	Uganik Island	Kukaklek
	Observation Mountain		Atmo Mountain / **Crosswind Lake**
Upper Fan (Sommet du Delta) Sols 750 à 1 000	Berea	Solva	Melyn
	Onahu	Ouzel Falls	Thunder Lake / Minto
	Onahu	Ouzel Falls	Otis Peak
	Mount Meeker	Dragon's Egg	Lost Lake
	Dream Lake	Gabletop Mountain	Pilot Mountain
Margin Campaign (l'unité Marginale) Sols 1 000 à 1 162	Mandu Wall	Amherst Point	Pelican Point
	Lake Newell	Bills Bay	Lefroy Bay
	Bunsen Peak	Castle Geyser	Comet Geyser
Neretva Vallis (Rivière) Sols 1 162 à 1 244	Cheyava Falls	Apollo Temple	Sapphire Canyon
Crater Rim (Bordure du cratère) Sols 1 300 à 1 703	Shallow Bay	Blue Hill	Silver Mountain
	Cat Arm Reservoir	Sol 1360	Fox_Pond
	Cat Arm Reservoir		Trap_Pond
	Tablelands	Serpentine Lake	Green Gardens
	Broom Point	Slants River	Main River
	Pine Pond	Hare Bay	Bell Island
	Kenmore	Laknes	Fisherlaguna
	Salmon Point	Strong Island	Gallants
	Vernodden		?

Rouge carottage échoué, Orange carottage sans échantillon de roche, Bleu patchs d'abrasion éloignés ou différé de la cible de carottage, et en gras zone de dépose 1 Three Forks / Cape NukShak

Liste des Patchs d'Abrasion de Perseverance

	Date	Sol	Cible	Location (Affleur.-Roche)	Secteur	Élévation -2 568 m	Dénivelé (Mètre)	Type de roche	Formation	Membre
1	19-07-2021	147	Beaujeu	Foux (?)	Polygon Valley	-2585	17	Affleurement	Máaz	n/a
2	02-08-2021	160	Guillaumes	Roubion	Polygon Valley	-2574	6	Affleurement	Máaz	Roubion
3	27-08-2021	185	Bellegarde	Rochette	Artuby Ridge	-2574	6	Roche	Máaz	Rochette
4	18-09-2021	206	Garde	Bastide	Sud Séítah Martre	-2569	1	Affleurement	Séítah	Bastide
5	05-11-2021	253	Dourbes	Brac	Sud Séítah Martre	-2574	6	Affleurement	Séítah	Bastide
6	16-12-2021	292	Quartier	Issole	Sud Séítah	-2580	12	Affleurement	Séítah	Bastide
7	09-02-2022	346	Montépézat	Rimplas	Artuby Ridge	-2568	0	Affleurement	Máaz	Artuby
8	02-03-2022	367	Alfalfa	Sid	Octavia E. Butler	-2585	17	Roche	Máaz	Ch'ał
Fin de la Campagne du Fond du Cratère (Crater Floor Campaign)										
9	29-05-2022	452	Rose River Falls	Sunset Hill	Hawksbill Gap	-2535	33	Affleurement	Shenandoah	Devil's Tanyard
10	17-06-2022	471	Elkwallow Gap	Hogwallow Flats	Hawksbill Gap	-2522	46	Affleurement	Shenandoah	Lower Rocky Top
11	30-06-2022	482	Thornton Gap	Skinner Ridge	Hawksbill Gap	-2520	48	Affleurement	Shenandoah	Lower Rocky Top
12	21-07-2022	504	Berry Hollow	Wildcat Ridge	Hawksbill Gap	-2523	45	Affleurement	Shenandoah	Hogwallow Flats
13	15-09-2022	558	Chiniak	Enchanted Lake	Cape NukShak	-2526	42	Affleurement	Shenandoah	Amalik
14	24-09-2022	567	Novarupta	Trident Volcano	Cape NukShak	-2518	50	Affleurement	Shenandoah	Amalik
15	09-11-2022	612	Uganik Island	Hidden Harbor	Cape NukShak	-2535	33	Affleurement	Shenandoah	Yori Pass
Fin de la Campagne du Front du Delta (Fan Front Campaign)										
16	25-03-2023	744	Solva	Berea	Tenby	-2449	119	Affleurement	Tenby	Skrinkle Haven
17	28-04-2023	777	Solitude Lake	Echo Creek	Ouest Belva	-2424	144	Affleurement	Tenby	Skrinkle Haven
18	09-05-2023	788	Ouzel Falls	Onahu	Powell Peak	-2421	147	Affleurement	Otis Peak	Emerald Lake
19	12-07-2023	850	Lake Haiyaha	Falcon Lake	Lookout Mountain ?	-2415	153	Roche		
20	28-07-2023	858	Dragon's Egg	Mount Meeker	Lobe K	-2416	152	Roche		
21	08-08-2023	877	Gabletop Mountain	Dream Lake	Hague Creek	-2418	150	Affleurement	Otis Peak	Dream Lake
22	25-08-2023	893	Thunderbolt_Peak	Willow Park	Fall River Pass ?	-2421	147	Régolithe	Otis Peak	Dream Lake
Fin de la Campagne du Sommet du Delta (Upper Fan Campaign)										
23	17-09-2023	915	Amherst Point	Hans Amundsen Memorial	Mandu Wall	-2423	145	Affleurement	Margin Unit	
24	07-10-2023	935	Bills Bay	Lake Newell	Turquoise Bay	-2407	161	Affleurement	Margin Unit	
25	04-03-2024	1080	Castle Geyser	Bunsen Peak	Nord Margin Unit ?	-2382	186	Roche	Margin Unit	
26	16-05-2024	1151	Old Faithful Geyser	?	Overlook Mountain	-2354	214	Roche		
27	14-06-2024	1179	Walhalla Glades	?	Bright Angel Outcrop	-2363	205	Affleurement		
Fin de la Campagne de l'unité Marginale (Margin Campaign) (fort signal de carbonate)										
28	26-06-2024	1191	Steamboat Mountain	Fern Glen Rapids	Bright Angel : Beaver Falls	-2354	214	Roche		
29	16-07-2024	1211	Apollo Temple	Cheyava Falls	Bright Angel : Beaver Falls	-2354	214	Affleurement		
30	19-08-2024	1243	Malgosa Crest	Wallace Butte	Serpentine Rapids	-2348	220	Régolithe		
Fin de la Campagne Neretva Vallis (signal de composés organiques complexe, présence de silice)										
31	13-09-2024	1257	Eremita Mesa	Specter Chasm	Hollenback Point	-2275	293	Roche		
32	31-10-2024	1315	Ranger Falls	?	Mist Park	-2040	528	Roche		
33	20-11-2024	1334	Rio Chiquito	?	Pico Turquino	-1988	580	Affleurement		
34	17-12-2024	1360	Cat Arm Reservoir	Cat Arm Reservoir	South Arm	-1812	756	Affleurement	Tablelands	South Arm
35	01-01-2025	1375	Blue Hill	Shallow Bay	Witch Hazel Hill	-1820	718	Affleurement	Tablelands	Shallow Bay
36	22-01-2025	1395	Steve's Trail	MillBrook	?	-1848	720	Affleurement	Witch Hazel Hill	MillBrook
37	31-01-2025	1404	Serpentine Lake	Tablelands	Witch Hazel Hill	-1821	747	Affleurement	Tablelands	Shallow Bay
38	05-03-2025	1436	Slants River	Broom Point	Witch Hazel Hill	-1918	650	Affleurement	Witch Hazel Hill	Broom Point
39	16-03-2025	1447	Puncheon Rock	Broom Point	Witch Hazel Hill	-1919	649	Affleurement	Witch Hazel Hill	
40	25-03-2025	1456	Great Mountain	Sally's Cove	Dennis Pond	-1927	641	Roche		
41	12-04-2025	1473	Strong Island	Salmon Point	Krokodillen	-1938	630	Affleurement	Krokodillen	Salmon Point
42	18-04-2025	1479	Hare Bay	Pine Pond	Witch Hazel Hill	-1925	643	Affleurement	Witch Hazel Hill	Broom Point
43	14-05-2025	1504	Coopers Head	Copper Cove	Krokodillen	-1975	593	Roche		
44	23-05-2025	1513	Marmen	Fallbreen	Krokodillen	-1964	604	Affleurement		
45	05-06-2025	1525	Laknes	Kenmore	Krokodillen	-1939	629	Affleurement		
46	25-06-2025	1545	Glide Brook	Main Topsail	Krokodillen	-1959	609	Affleurement		

47	27-06-2025	1547	Jigging Cove	Main Topsail	Krokodillen	-1959	609	Affleurement		
48	17-07-2025	1567	Drake's Point	Westport	Krokodillen	-1964	604	Roche		
49	31-08-2025	1610	Nordoya	Scotiafjellet		-1875	693	Affleurement		
50	08-09-2025	1618	Peachflya	Taylorfjellet	Vernodden	-1874	694	Affleurement		
51	13-09-2025	1623	Klorne	Jessiefjellet	Vernodden	-1876	692	Affleurement		
52	21-09-2025	1631	Stigbreen	Monacofjellet/Petuniaskaret	Vernodden	-1873	695	Roche		
53	10-10-2025	1649	Aitkenodden	Plankeholmane	Vernodden	-1864	704	Affleurement		
54	24-10-2025	1663	Pyramiden	Vitulinaholmen	Vernodden	-1854	714	Affleurement		
55	09-11-2025	1678	Ruggen	Rundodden	Rundodden	-1910	658	Roche		
56	23-11-2025	1692	Bubenka	Char	?	-1864	704	Affleurement		
Fin de la Campagne Crater Rim (Witch Hazel Hill) (fort signal de phyllosilicates et d'olivine, présence de silice de et serpentine)										
57	10-02-2026	1769	Djuma	Olifants	Lac de Charmes	-1965	603	Affleurement		
58	27-02-2026	1785	Shingwedzi	Mogaba	Lac de Charmes	-1959	609	Affleurement		
59	08-03-2026	1794	Pafuri Gate	Arethusa	Lac de Charmes	-1958	610	Roche		
60	21-03-2026	1807	Mauchsberg	Olivine Shelf	Lac de Charmes	-1978	590	Affleurement		
61	05-04-2026	1821	Vingeanne	Montot	?	-1968	600	Roche		
62	28-04-2026	1844	Montelet	Vix	?	-1974	594	Affleurement		
63	03-05-2026	1849	Cote d'Or	Lac de Charmes	?	-1965	603	Affleurement		
64	25-05-2026	1870	Cret Au Loup	Chaunot	?	-1958	610	Affleurement		
65	10-06-2026	1886	Pennessiere	Obtree	?	-1952	616	Affleurement		
66	02-07-2026	1907	Foulain	Le Meix	?	-1973	595	Affleurement		
67	09-07-2026	1914	Chaumont	Chaufour	?	-1959	609	Affleurement		
68	25-07-2026	1930	La Suize	Groloy	?	-1928	640	Affleurement		
69	01-09-2026	1967	Badger Peak	?	?	?	?	Roche		
70										
71										
Fin de la Campagne Nili Fossae										

Bleu : largage de la mèche d'abrasion Pre-launch, Rouge : Pachs d'abrasion infructueuses (unsuccessful), Orange : Pachs d'abrasion sans échantillon de carottage, les Sols au fond Gris roche trop dure ou qui bouge trop, et les Sols au fond Vert indique que la roche c'est fracturée lors de l'abrasion (ou roche évaluée trop friables ou instable dans le cas d'un affleurement pour faire un échantillonnage par carottage). Élévation : au-dessus du niveau de référence (-2 568 mètres)

Sur les 43 tubes en titane que Perseverance a amenés sur Mars, 38 sont destinés au prélèvement d'échantillons (30 tubes utilisés, 28 scellés), et cinq sont des « tubes témoins » conçus pour documenter la propreté de son système d'échantillonnage tout au long de la mission. Trois tubes témoins ont été scellés : le Sol 120 (no 61, 22 juin 2021), le Sol 499 (no 205, 16 juillet 2022) et le Sol 586 (no 188, 14 octobre 2022). Le troisième tube témoin, scellé au lieu d'échantillonnage « Amalik », a été placé dans le dépôt d'échantillons de secours du rover. Il reste 8 tubes à échantillon et 2 tubes témoins.

-Mars 2020 Initial Reports Volume
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mars2020/returned_sample_science.htm
-Samples Collected From the Floor of Jezero Crater With the Mars 2020 Perseverance Rover: 09 February 2023
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022JE007474
-Overview and Results From the Mars 2020 Perseverance Rover's First Science Campaign on the Jezero Crater Floor: 10 May 2023
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022JE007613
-Evidence of Sulfate-Rich Fluid Alteration in Jezero Crater Floor, Mars: 24 January 2024
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023JE007989
-Sulfates de dépôt et diagénétiques des plaines de Hogwallow et du col Yori, cratère Jezero : évaluation du potentiel de préservation des indicateurs environnementaux et des biosignatures possibles des eaux de surface et des eaux souterraines martiennes passées: 06 février 2024
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023JE008155
-Sedimentology and Stratigraphy of the Shenandoah Formation, Western Fan, Jezero Crater: 15 February 2024
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023JE008187
-Depositional and Diagenetic Sulfates of Hogwallow Flats and Yori Pass, Jezero Crater: Evaluating Preservation Potential of Environmental Indicators and Possible Biosignatures From Past Martian Surface Waters and Groundwaters, 06 February 2024
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023JE008155
-PIXL ANALYSES OF SEDIMENTARY ROCKS IN THE MARS 2020 PERSEVERANCE UPPER FAN CAMPAIGN IN JEZERO CRATER
https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/pdf/2365.pdf
-Mars Perseverance Raw Image of the Week
https://mars.nasa.gov/mars2020/multimedia/raw-images/
-NASA Échantillons : https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/mars-rock-samples/

Liste de tous les Carottages de Perseverance

	Date	Sol	Nom	Location (Affl.-Roche)	Secteur	Type	Tube	Formation	Membre	Durée (Sol)
1	06-08-2021	164	Roubion	Roubion	Polygon Valley	Atmospherique	233	Máaz	Roubion	157-167
2	01-09-2021	190	Montdenier	Rochette	Artuby Ridge	Roche	266			190-194
3	07-09-2021	195	Montagnac	Rochette	Artuby Ridge	Roche	267			195-199
4	14-11-2021	262	Salette	Brac	Martre	Roche	246	Séítah	Bastide	262-271
5	23-11-2021	271	Coulettes	Brac	Martre	Roche	284			271-278
6	20-12-2021	296	Robine	Issole	Sud Séítah	Roche	206			296-305
7	30-12-2021	306	Pauls	Issole	Sud Séítah	Roche				306-322
8	31-01-2022	337	Malay	Issole	Sud Séítah	Roche	261			335-339
9	07-03-2022	371	Ha'ahóni	Sid	Octavia E. Butler	Roche	262	Máaz	Ch'ał	362-371
10	13-03-2022	377	Atsáh	Sid	Octavia E. Butler	Roche	202	Máaz	Ch'ał	377-379
Fin de la Campagne du Fond du Cratère (Crater Floor Campaign)										
11	07-07-2022	490	Swift Run	Skinner Ridge	Hawksbill Gap	Roche	186	Shenandoah	Lower Rocky Top	490-494
12	12-07-2022	495	Skyland	Skinner Ridge		Roche	272		Lower Rocky Top	495-500
13	26-07-2022	509	Hazeltop	Wildcat Ridge		Roche	172		Hogwallow Flats	509-515
14	03-08-2022	516	Bearwallow	Wildcat Ridge		Roche	259		Hogwallow Flats	516-534
15	02-10-2022	575	Shuyak	Amalik	Cape NukShak	Roche	264		Amalik	575-578
16	06-10-2022	579	Mageik	Amalik		Roche	184		Amalik	579-591
17	21-11-2022	623	Kukaklek	Hidden Harbor		Roche	242		Yori Pass	626-629
18	02-12-2022	634	Atmo Mountain	Observation Mountain		Régolithe	059			634-638
19	07-12-2022	639	Crosswind Lake	Observation Mountain		Régolithe	173			639-641
Fin de la Campagne du Front du Delta (Fan Front Campaign)										
20	30-03-2023	749	Melyn	Berea	Tenby	Roche	214	Tenby	Skrinkle Haven	749-753
21	23-05-2023	802	Thunder Lake	Onahu	Powell Peak	Roche				804-812
22	04-06-2023	813	Minto		Powell Peak	Roche				813-815
23	13-06-2023	822	Otis Peak		Emerald Lake	Roche	254	Otis Peak	Emerald Lake	822-836
24	25-07-2023	863	Lost Lake	Mount Meeker	Lobe K	Roche				856-866
25	14-08-2023	882	Pilot Mountain	Dream Lake	Hague Creek	Roche	258	Otis Peak	Dream Lake	913-923
Fin de la Campagne du Sommet du Delta (Upper Fan Campaign)										
26	25-09-2023	923	Pelican Point	Mandu Wall	Hans Amundsen Memorial	Roche	178			923-926
27	21-10-2023	942	Lefroy Bay	Lake Newell	Turquoise Bay	Roche	263			942-950
28	12-03-2024	1088	Comet Geyser	Bunsen Peak	Nord Margin Unit?	Roche	174			1088-92
Fin de la Campagne de l'unité Marginale (Margin Campaign) (fort signal de carbonate)										
29	21-07-2024	1215	Sapphire Canyon	Cheyava Falls	Bright Angel : Beaver Falls	Roche	244			1210-19
Fin de la Campagne Neretva Vallis (signal de composés organiques complexe, présence de silice)										
30	28-01-2025	1401	Silver Mountain	Shallow Bay	Witch Hazel Hill	Roche	283	Tablelands	Shallow Bay	1401-03
31	05-02-2025	1409	Fox_Pond	Cat Arm Reservoir	South Arm	Roche			South Arm	1408-11
32	09-02-2025	1413	Trap_Pond	Cat Arm Reservoir	South Arm	Roche			South Arm	1411-15
33	17-02-2025	1420	Green Gardens	Tablelands	Witch Hazel Hill	Roche	041	Tablelands	Shallow Bay	1420-33
34	10-03-2025	1441	Main River	Broom Point		Roche	010	Witch Hazel Hill	Broom Point	1441-45
35	22-04-2025	1483	Bell Island	Pine Pond		Roche	032	Witch Hazel Hill	Broom Point	1483-97
36	10-06-2025	1531	Fisherlaguna	Kenmore	Krokodillen	Affleurement				1528-40
37	02-07-2025	1552	Gallants	Salmon Point	Krokodillen	Roche	019	Krokodillen	Broom Point	1551-55
38	01-11-2025	1671	?		Vernodden	Roche				1671-74
Fin de la Campagne Crater Rim (Witch Hazel Hill) (fort signal de phyllosilicates et d'olivine, présence de silice de et serpentine)										

Rouge Zone de Dépôt 1, Orange carottage sans échantillon de roche, Bleu carottage échoué, et les Sols au fond vert indique que la roche c'est fracturée lors du carottage (sans échantillon), les Sols au fond jaune rencontre de problème technique logiciel ou mécanique et abandon du processus de stockage ou de carottage, les Sols au fond gris indique que l'échantillon c'est désintégré (tube vide), et les Sols au fond rouge indique

que le trépan n'a pas creuser suffisamment profond pour recueillir un noyau de la longueur requise

Sur les 43 tubes en titane que Perseverance a amenés sur Mars, 38 sont destinés au prélèvement d'échantillons (30 tubes utilisés, 28 scellés), et cinq sont des « tubes témoins » conçus pour documenter la propreté de son système d'échantillonnage tout au long de la mission. Trois tubes témoins ont été scellés : le Sol 120 (no 61, 22 juin 2021), le Sol 499 (no 205, 16 juillet 2022) et le Sol 586 (no 188, 14 octobre 2022). Le troisième tube témoin, scellé au lieu d'échantillonnage « Amalik », a été placé dans le dépôt d'échantillons de secours du rover. Il reste 8 tubes à échantillon et 2 tubes témoins.

-Mars 2020 Initial Reports Volume
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mars2020/returned_sample_science.htm

Échantillons : https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/mars-rock-samples/

Liste des Vols d'Ingenuity

	Date	Sol	Distance (m)	Altitude (m)	Vitesse (m/s)	Durée de Vol (secondes)	Trajet	
							De	Vers
1	19-04-2021	58	0	3	0,00	39,1	Airfield A	Airfield A
2	22-04-2021	61	4	5	0,50	51,9	Airfield A	Airfield A
3	25-04-2021	64	100	5	2,00	80,3	Airfield A	Airfield A
4	30-04-2021	69	266	5	3,50	116,9	Airfield A	Airfield A
5	07-05-2021	76	129	10	2,00	108,2	Airfield A	Airfield B
6	22-05-2021	91	215	10	4,00	139,9	Airfield B	Airfield C
7	08-06-2021	107	106	10	4,00	62,8	Airfield C	Airfield D
8	21-06-2021	120	160	10	4	77.4	Airfield D	Airfield E
9	05-07-2021	133	625	10	5	166.4	Airfield E	Airfield F
10	24-07-2021	152	233	12	5	165.4	Airfield F	Airfield G
11	04-08-2021	163	383	12	5	130.9	Airfield G	Airfield H
12	16-08-2021	174	450	10	4.30	169.5	Airfield H	Airfield H
13	04-09-2021	193	210	8	3.30	160.5	Airfield H	Airfield H
14	24-10-2021	241	2	5	0.50	23.0	Airfield H	Airfield H
15	06-11-2021	254	407	12	5	128.8	Airfield H	Airfield F
16	20-11-2021	268	116	10	1.50	107.9	Airfield F	Airfield J
17	05-12-2021	282	187	10	2.50	116.8	Airfield J	Airfield K
18	15-12-2021	292	230	10	2.50	124.3	Airfield K	Airfield L
19	07-02-2022	345	63	10	1	99.8	Airfield L	Airfield E
20	25-02-2022	362	391	10	4.40	130.3	Airfield E	Airfield M
21	10-03-2022	375	370	10	3.85	129.2	Airfield M	Airfield N
22	19-03-2022	384	68	10	1	101.4	Airfield N	Airfield N
23	23-03-2022	388	358	10	4	129.1	Airfield N	Airfield P
24	03-04-2022	398	47	10	1.45	69.5	Airfield P	Airfield P
25	08-04-2022	403	704	10	5.50	161.3	Airfield P	Airfield Q
26	19-04-2022	414	360	8	3.80	159.0	Airfield Q	Airfield R
27	23-04-2022	418	307	10	3	152.9	Airfield R	Airfield S
28	29-04-2022	423	418	10	3.60	152.4	Airfield S	Airfield T
29	11-06-2022	465	179	10	5.50	66.6	Airfield T	Airfield U
30	20-08-2022	533	2	5	0.50	33.3	Airfield U	Airfield U
31	06-09-2022	550	97	10	4.75	55.6	Airfield U	Airfield V
32	17-09-2022	561	94	10	4.75	55.3	Airfield V	Airfield W
33	24-09-2022	567	111	10	4.75	55.2	Airfield W	Airfield X
34	22-11-2022	625	0	5	0	18.3	Airfield X	Airfield X
35	03-12-2022	635	15	14	3	52.0	Airfield X	Airfield X
36	10-12-2022	642	110	10	5.50	60.5	Airfield X	Airfield X
37	17-12-2022	649	62	10	3	55.2	Airfield X	Airfield Y
38	04-01-2023	667	111	10	3.50	74.3	Airfield Y	Airfield Z
39	11-01-2023	673	140	10	4	78.7	Airfield Z	Airfield Z
40	19-01-2023	681	178	10	3.20	91.6	Airfield Z	Airfield Beta
41	27-01-2023	689	183	10	3	109.1	Airfield Beta	Airfield Beta
42	04-02-2023	697	248	10	3	137.2	Airfield Beta	Airfield Gamma
43	16-02-2023	708	390	12	4	146.0	Airfield Gamma	Airfield Epsilon
44	19-02-2023	711	334	12	3.50	141.3	Airfield Epsilon	Airfield Zeta
45	22-02-2023	714	496	12	6	144.5	Airfield Zeta	Airfield Eta
46	25-02-2023	717	445	12	5.30	135.9	Airfield Eta	Airfield Theta
47	09-03-2023	729	440	12	5.30	146.1	Airfield Theta	Airfield Iota
48	21-03-2023	741	398	12	4.65	149.9	Airfield Iota	Airfield Kappa
49	02-04-2023	752	282	16	6.50	142.7	Airfield Kappa	Airfield Lambda
50	13-04-2023	763	322	18	4.60	145.7	Airfield Lambda	Airfield Mu
51	22-04-2023	772	188	12	4	136.9	Airfield Mu	Airfield Nu
52	26-04-2023	776	363	12	3.70	145.0	Airfield Nu	Airfield Xi
53	22-07-2023	860	143	5	2.50	74.9	Airfield Xi	Airfield Omicron
54	03-08-2023	872	0	5	0	24.4	Airfield Omicron	Airfield Omicron
55	12-08-2023	881	264	10	4.70	142.9	Airfield Omicron	Airfield Pi
56	25-08-2023	894	410	12	5.30	140.9	Airfield Pi	Airfield Rho
57	03-09-2023	902	217	10	3	128.6	Airfield Rho	Airfield Rho
58	11-09-2023	910	174	10	3	106.8	Airfield Rho	Airfield Sigma
59	16-09-2023	915	0	20	0	142.6	Airfield Sigma	Airfield Sigma
60	25-09-2023	924	340	16	8	132.8	Airfield Sigma	Airfield Tau
61	05-10-2023	933	0	24	0	129.5	Airfield Tau	Airfield Tau

62	12-10-2023	940	268	18	10	121.1	Airfield Tau	Airfield Tau
63	19-10-2023	947	579	12	6.30	142.6	Airfield Tau	Airfield Upsilon
64	27-10-2023	954	411	12	5.80	139.1	Airfield Upsilon	Airfield Phi
65	02-11-2023	960	7	10	1	48.0	Airfield Phi	Airfield Phi
66	03-11-2023	961	1	3	1	23.0	Airfield Phi	Airfield Phi
67	02-12-2023	990	393	12	5.30	135.9	Airfield Phi	Airfield Chi
68	15-12-2023	1003	702	16	10	131.1	Airfield Chi	Airfield Chi
69	20-12-2023	1007	705	16	10	135.4	Airfield Chi	Airfield Chi
70	22-12-2023	1009	260	12	3	132.9	Airfield Chi	Airfield Chi
71	06-01-2024	1024	0	12	7	35.0	Airfield Chi	Airfield Chi
72	18-01-2024	1035	0	12	0	32.0	Airfield Chi	Airfield Chi

Nombre de vol :	72	Distance record :	Sol 1007 - 705 mètres
Durée total de vol :	128,8 minutes (2h08)	Durée record :	Sol 174 - 169,5 secs
Parcours total :	16,969 km	Altitude record :	Sol 933 - 24 mètres
Vitesse Max :	Sol 1003 - 36 km/h, 10 m/sec		
Premier Vol :	Sol 58, 19 avril 2021		
Dernier Vol :	Sol 1035, 18 janvier 2024 (2 ans et 9 mois)		

Flight Log : https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/#Flight-Log
Location Map for Ingenuity : https://mars.nasa.gov/maps/location/?mission=M20&site=jez

List of SHERLOC Targets Analyzed in This Work :

Target name	Abrasion performed on sol	SHERLOC spectroscopy obtained on sol	SHERLOC spectroscopy start time (LMST)	Scan types obtained (laser pulses per point)
Séítah				
Garde	206	207	20:19	HDR ×2 (500/500)
		208	19:37	Detail ×3 (500/500/500)
Dourbes	253	257	20:03	HDR ×1 (500)
		269	19:50	Detail ×3 (500/500/500)
Quartier	292	293	20:01	HDR ×1 (500)
		304	21:01	Detail ×4 (500/500/500/500)
Máaz				
Nataan	Natural (LIBS-cleared)	83	12:18	HDR ×1 (100)
Bi La Sana	Natural	98	11:27	HDR ×3 (100/100/300)
Foux	Natural (LIBS-cleared)	141	12:21	HDR ×3 (100/100/300)
Guillaumes	160	161	16:28	HDR ×3 (100/100/300)
		162	19:58	HDR ×2 (250/250)
Bellegarde	185	186	18:55	HDR ×2 (250/250)
Montpezat	346	349	20:04	HDR ×1 (500)
Fan front (Shenandoah)				
Pignut Mountain	Natural (LIBS-cleared)	463	20:19	HDR ×1 (500)
Shop Hollow	Natural	480	20:02	HDR ×1 (500)
Thornton Gap	482	489	19:31	HDR ×2 (500/500)
				Detail ×2 (500/500)
Berry Hollow	504	505	18:45	HDR ×1 (500)
				Detail ×1 (500)
		513	20:50	Detail ×4 (500/500/500/500)
Chiniak	Natural (LIBS-cleared)	558	18:51	Detail ×1 (500)
Novarupta	Natural (LIBS-cleared)	567	18:32	HDR ×1 (500)
	568	570	19:19	HDR ×1 (500)
		573	19:51	Detail ×2 (500/500)
Uganik Island	612	614	19:32	HDR ×1 (500)
				Detail ×2 (500/500)
		617	19:09	HDR ×1 (500)

Target name	Abrasion performed on sol	SHERLOC spectroscopy obtained on sol	SHERLOC spectroscopy start time (LMST)	Scan types obtained (laser pulses per point)
				Detail ×2 (500/500)
		618	19:30	Detail ×2 (900/500)
		620	19:32	Detail ×2 (900/500)
Utz Gap	Natural (gDRT-cleared)	697	21:03	Detail ×4 (500/500/500/500)
Upper fan (Tenby)				
Solva	742	747	20:15	Detail ×2 (500/500)
		751	20:42	Detail ×2 (900/900)
Pipit Lake	Natural (gDRT-cleared)	781	20:11	Detail ×1 (500)
Solitude Lake	777	782	19:51	Detail ×2 (500/500)
Ouzel Falls	788	789	20:04	Detail ×1 (500)
		790	19:58	Detail ×2 (900/900)
		810	19:37	Detail ×2 (500/500)
Pilot Mountain	Natural (gDRT-cleared)	874	20:47	Detail ×1 (500)
Gabletop Mountain	877	879	20:01	Detail ×4 (500/500/500/500)
Thunderbolt Peak	Natural (gDRT-cleared)	888	20:16	Detail ×1 (500)
	893	894	20:29	Detail ×2 (500/500)

Characterizing Hydrated Sulfates and Altered Phases in Jezero Crater Fan and Floor Geologic Units With SHERLOC on Mars 2020, 20 July 2024
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023JE008251

List of SHERLOC Targets Analyzed in This Work :

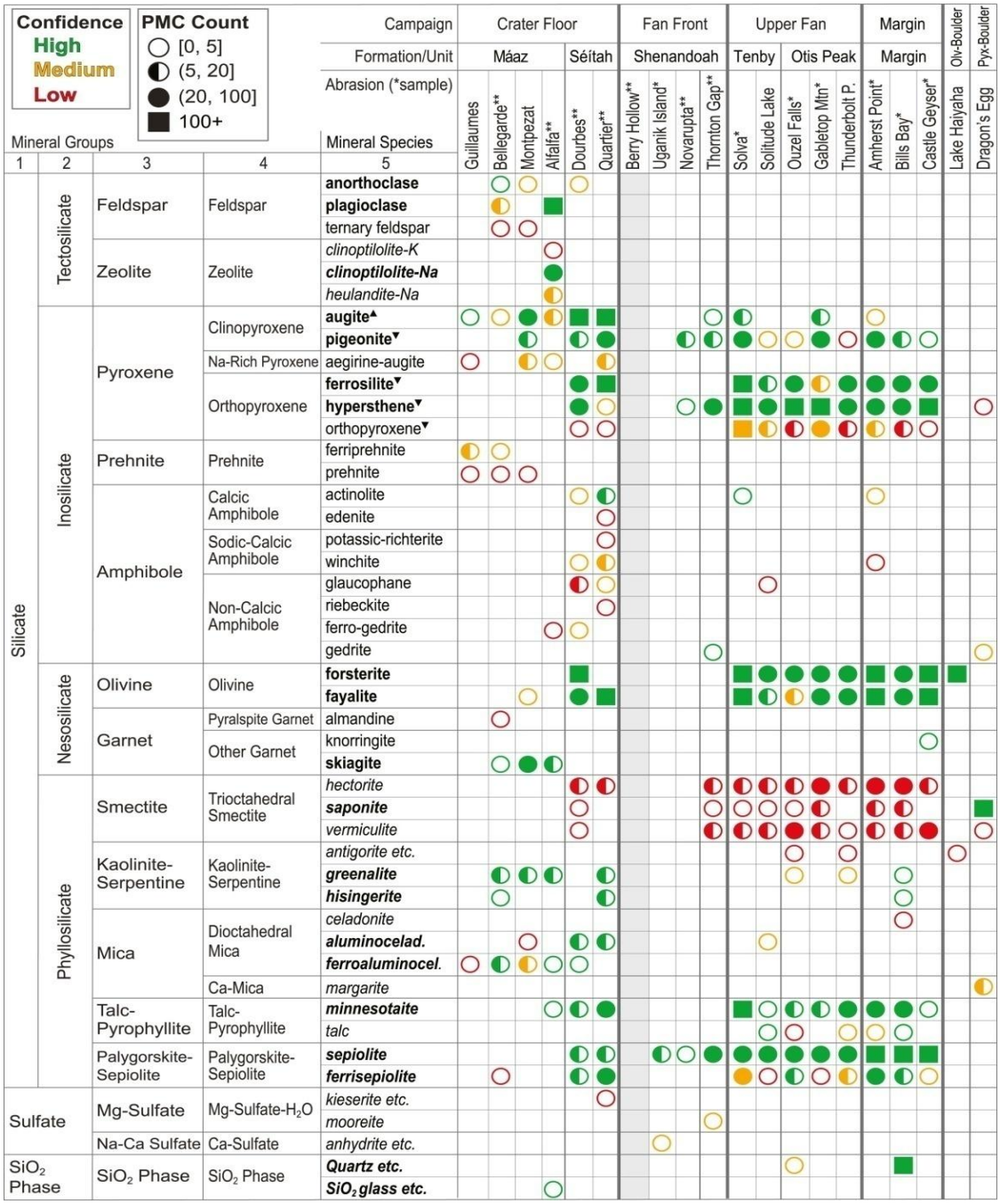
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023JE008251

Tableau 1. Sept cycles de production d'oxygène réalisés avec succès par MOXIE en 2021.

Run	Mission (sol)	Date (2021)	Time	Pressure (Pa)	Temperature (K)	Duration of O_2 production (min)	O_2 produced (g)	O_2 total (g)
FM OC9	60	20 April	Night	751	201	59	5.4	5.4
FM OC10	81	12 May	Night	768	199	74	6.9	12.3
FM OC11	100	1 June	Day	757	256	71	6.9	19.2
FM OC12	155	27 July	Night	737	201	96	8.9	28.1
FM OC13	176	17 August	Night	720	199	82	8.1	36.2
FM OC14	241	24 October	Night	651	206	73	6.9	43.1
FM OC15	276	29 November	Day	631	253	74	6.8	49.9

Expérience MOXIE (Mars Oxygen ISRU Experiment) : Préparation à l'exploration humaine de Mars 31 août 2022
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abp8636

Tableau d'identification des minéraux par balayage, pour les différentes campagnes d'analyse des données PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry) après dépoussiérage.



Multiple Episodes of Fluid Alteration in Jezero Crater Indicated by MIST Mineral Identifications in PIXL XRF Data From the First 1100 Sols of the Mars 2020 Mission: 11 September 2025
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2024JE008797

Résumé des détections effectuées par la caméra Raman SuperCam au cours des 1 000 premiers sols de la mission

Region	Olivine				Sulfate			
	Unit/Outcrop	Sample	Type	Sols	Unit/Outcrop	Sample	Type	Sols
Crater floor					Maaz	Guillaumes	Abraded patch	162
	Séítah	Garde	Abraded patch	207, 209, 210	Séítah	Quartier		297
		Dourbes		207, 209, 210				
		Quartier		259, 268, 278				
		Penne	Natural surface	295, 303				
		Brac		211				
		Castellet		246, 247				
Delta front					Hogwallow Flats	Reids Gap	Light-toned vein	466
						Dovel Mountain		512
						Mill Prong		517
						Berry Hollow	Abraded patch	518
					Yori Pass	Kupreanof Strait	Light-toned vein	620
						Uganik Island	Abraded patch	619
Delta Upper fan	Curvilinear	Solva	Abraded patch	748, 751	Curvilinear	Solva		751
						Solitude Lake		783
	Blocky	Ouzel Falls		791, 792, 803				
	Lobe/Trough m	Gabletop Mountain		881	Lobe/Trough m	Thunderbolt Peak	Abraded patch	896
		Thunderbolt Peak						
		Thunderbolt Peak	Natural surface, GDRT	890				
	Olivine-rich Boulder	Mount Chapin	Natural surface	848	Pyroxene-rich Boulder in Mount Meeker	Dragons Egg		862
		Lake Haiyaha	Abraded patch	853				
Delta Margin	Hans Amundsen Memorial Workspace	Amherst Point	Abraded patch	922, 925				
					Turquoise Bay outcrop	Bills Bay	Abraded patch	940

Résumé des détections effectuées par la caméra Raman SuperCam au cours des 1 000 premiers sols de la mission								
Region	**Carbonate**				**Perchlorate**			
	Unit/Outcrop	**Sample**	**Type**	**Sols**	**Unit/Outcrop**	**Sample**	**Type**	**Sols**
Crater floor					Maaz	Guillaumes	Abraded patch	162
						Bellegarde		188
	Séítah	Garde	Abraded patch	209	Séítah	Quartier		303
Delta front	Lower Rockytop	Thornton Gap	Abraded patch	486, 491, 493, 498				
Delta Upper fan	Curvilinear	Solva	Abraded patch	748, 751				
		Solitude Lake		783				
	Blocky	Ouzel Falls		803				
	Lobe/Trough m	Gabletop_Mountain_88		881				
Delta Margin	Hans Amundsen Memorial Workspace	Amherst Point	Abraded patch	925				
	Turquoise Bay outcrop	Bills Bay		940, 941				

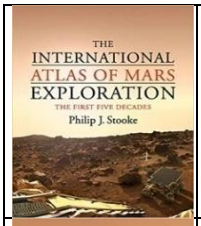
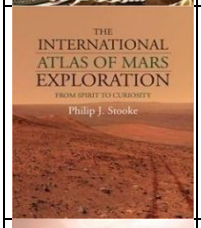
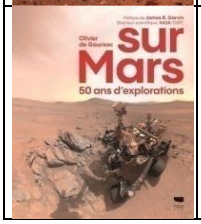
Activités de la caméra Raman SuperCam dans le cratère Jezero, sur Mars : stratégies d'observation, traitement des données et détections de minéraux durant les 1 000 premiers sols : 15 novembre 2025
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025JE008943

RÉFÉRENCES WEB

Général

- Site de la Nasa
  - Mars Exploration : Sélection par mission
    https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions
  - Analyst's Notebook
    https://an.rsl.wustl.edu/
- Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology
  - Le site du Photojournal :
    http://photojournal.jpl.nasa.gov/
  - Sélection par Planète :
    http://mars.jpl.nasa.gov/missions/
  - Sélection par les Missions :
    http://photojournal.jpl.nasa.gov/Help/PIADetQuery.html
  - Liste des images Raws
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/all/spirit.html
- ESA : Agence Spatiele Européenne
  http://www.esa.int/esaCP/France.html
- The Planetary Society :
  http://www.planetary.org/blogs/
- Flashespace en direct du ciel et de l'espace
  http://www.flashespace.com/archives.htm
- Planète Terre (Ens de Lyon)
  http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/actualite_des_labos/dossiers/nouvelles-mars
- Nirgal : De la Planète Rouge à l'origine de la Vie, de Philippe Labrot
  http://www.nirgal.net/main.html
- PlaneteAstronomie.com
  http://www.planetastronomy.com/dossiers-astro/mars-dossier.htm
- Planète Mars
  http://solarnews.over-blog.com/ext/http://www.planete-mars.com/
- Orbite Mars
  http://orbitmars.futura-sciences.com/
- Astrocosmos.net
  http://www.astrocosmos.net/canvas.php?page=archive.php
- Application MarsLife pour voir les panoramas en virtuelle 3D (Perseverance, Curiosity, Spirit et Opportunity)
  https://marslife.org/
- Le site Astronomie-Astronautique de JcBoulay
  http://jcboulay.free.fr/index.htm
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)

https://umsfarchive.com/index.php/index.php
- Le Forum AstruSurf
http://www.astrosurf.com/forum/3-astronomie-g%C3%A9n%C3%A9rale/
- Wikipedia : Mars (Planète)
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_(plan%C3%A8te)
- Vidéo de la Comparaison de tous les engins spatiaux sur Mars
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_(plan%C3%A8te)

	The International Atlas of Mars Exploration: Volume 1, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2012
	The International Atlas of Mars Exploration: Volume 2, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2014
	Sur Mars : 50 ans d'explorations martiennes, Olivier de Goursac, Delachaux et Niestlé 2026

Tianwen-1 Zhùróng

- Site de l'administration spatiale nationale chinoise (CNSA)
https://clpds.bao.ac.cn/
- Lunar and Planetary Data – Release System
https://clpds.bao.ac.cn/web/zhmanager/kxsj?missionName=HX1&zhName=HiRIC&grade=DIM-0.7
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
https://umsfarchive.com/index.php/viewforum.php?f=88
- Forum AstruSurf
http://www.astrosurf.com/topic/135563-tianwen-1-la-chine-%C3%A0-la-conqu%C3%AAte-de-mars/
- Forum NASA
https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?PHPSESSID=mr91o2n5jib48kg01o4md4oce4&topic=35045.0
- Nirgal : Programme Tianwen-1 Zhùróng, de Philippe Labrot
https://www.nirgal.net/zhurong_landing.html
- Les Panoramas de Doug Ellison :

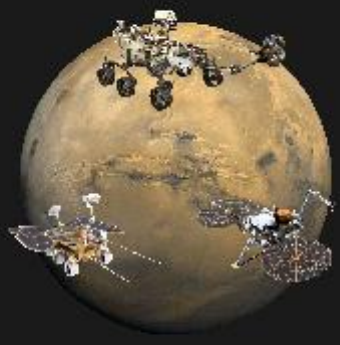
https://dougellison.smugmug.com/Zhurong-Panoramas
- Histoires sur Zhurong
https://www.autoevolution.com/newstag/Zhurong/
- Wikipedia : Programme Tianwen-1 Zhùróng
https://fr.wikipedia.org/wiki/Zhurong_(rover)
https://fr.wikipedia.org/wiki/Tianwen_1#Astromobile_(rover)_2
- AGU: Journal of Geophysical Research: Planets
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/action/doSearch?field1=AllField&text1=Zhurong&publication%5B%5D=21699100&Ppub

Mars 2020 Perseverance

- Site de la Nasa
https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/
- Mission Updates
https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/science-updates/
- News
https://science.nasa.gov/mars/resources/?pageno=22&search=Perseverance
- Raw Images
https://mars.nasa.gov/mars2020/multimedia/raw-images/
- Échantillonnages
https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/mars-rock-samples/
- Flight Log
https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/#Flight-Log
- Mars 2020 initial reports (pdf)
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mars2020/returned_sample_science.htm
- Where is Perseverance?
https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/location-map/
- Where is Ingenuity?
https://mars.nasa.gov/maps/location/?mission=M20&site=jez
- PDS Geosciences Node : Mars 2020 Perseverance Rover Mission
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mars2020/
- JPL Robotics: Publications
https://www-robotics.jpl.nasa.gov/achievements/publications/
- High resolution multi-color stereo zoom cameras for the NASA Mars 2020 Perseverance rover (Mastcam-Z 360°) Compilé et maintenu par Jim Bell et Jonathan Joseph
https://mastcamz.asu.edu/
- Mars360 (Andrew Bodrov)
https://www.360cities.net/sets/perseverance-mars
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
https://umsfarchive.com/index.php/viewforum.php?f=80
- Forum AstruSurf
http://www.astrosurf.com/topic/20161-mars-2020-rover/
- Nirgal : Programme Tianwen-1 Zhùróng Mars 2020 Perseverance **(**Philippe Labrot**)**
https://www.nirgal.net/mars2020.html

- Blog Marsrovers Images (Damia Bouic)
https://db-prods.net/marsroversimages/index.php
- Planète Terre : Perseverance, une qualité essentielle dans l'exploration de Mars (17/02/2021)
https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/Perseverance-fevrier-2021.xml
- Wikipedia : Mars 2020 (mission spatiale)
https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_2020_(mission_spatiale)
Exploration de Mars par Perseverance
https://fr.wikipedia.org/wiki/Exploration_de_Mars_par_Perseverance
- AGU: Journal of Geophysical Research: Planets
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/action/doSearch?field1=AllField&text1=Perseverance+Rover&publication%5B%5D=21699100&Ppub
- Mars Guy (courte vidéo de synthèse sur Youtube)
https://www.youtube.com/@MarsGuy
- Transit of Deimos from Mars
https://en.wikipedia.org/wiki/Transit_of_Deimos_from_Mars
- Transit of Phobos from Mars
https://en.wikipedia.org/wiki/Transit_of_Phobos_from_Mars

- Autres avec Images
Panorama de Neville Thompson
http://www.nev-t-gigamacros.com/
Panorama de Thomas Appéré
https://www.flickr.com/photos/thomasappere/page1
Panorama de Damia Bouic
https://db-prods.net/marsroversimages/galerie.php
Panorama de Kevin Gill | URL: https://www.apoapsys.com
https://www.flickr.com/photos/kevinmgill
Panorama de James Sorencon
https://www.flickr.com/photos/43581439@N08/with/51199570519
Panorama de Simeon Schmauß
https://www.flickr.com/photos/semeion/
Panorama de Steve Albers
https://stevealbers.net

Ce livre rencontre l'histoire des missions d'exploration de la surface martienne, qui ont réussi à se poser avec succès à la surface de la planète Mars. Le volume 2 poursuit cette épopée pour rendre témoignage à cette extraordinaire réussite technologique, scientifique et humaine. Nous retrouvons la description des missions martiennes qui ont suivies les sept premières traitées dans le volume 1. Le déroulement de chaque mission (InSight et suivante) ainsi que leurs différentes découvertes scientifiques sont décrites de manière chronologique et illustrée à l'aide des clichés panoramiques pris à la surface de la planète rouge. Participer vous aussi à cette extraordinaire aventure axée sur la découverte d'un nouveau Monde

InSight, Tianwen-1/Zhurong, Mars 2020 Perseverance